

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Федоров В. К., Пестрикова И. Е., Федоров И. В.,
Аношенкова Е. В., Федоров Д. В.*

МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ И ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО
ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В РЕЖИМЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

5

Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФА
НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

15

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Харитонов В. В., Зинкин В. Н., Драган С. П.
ДИНАМИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ
В КАБИНЕ ЭКИПАЖА ВОЗДУШНОГО СУДНА

20

Ефремов А. С., Иванов А. В., Лукичев Л. В.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ
ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

30

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Рыблова Е. А., Волков В. С.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ КРУГЛОЙ
МЕМБРАНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

39

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Буньгин Е. В., Чайковский В. М.

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КИСТЬЮ РУКИ

47

Крамм М. Н.

БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА
К ЭКВИВАЛЕНТНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ
ГЕНЕРАТОРУ СЕРДЦА ДЛЯ ЗАДАЧ НЕИНВАЗИВНОЙ
ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

53

Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И., Безбородов С. А., Гусев В. Г.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ
АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

60

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Леонидов Н. В., Митина М. В.

ОБРАЗ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ
К ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКЕ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

66

Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С.,

Здобнов С. А., Колтин Д. Н.

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

71

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

№ 2, 2021

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Fedorov V.K., Pestrikova I.E., Fedorov I.V., Anoshenkova E.V., Fedorov D.V.
MAXIMUM ENTROPY AND THE PRINCIPLE
OF LEAST ACTION FOR ELECTRICAL SYSTEMS
IN THE MODE OF DETERMINISTIC CHAOS

5

Ketov D.Yu., Nefed'ev A.I.
DISTRIBUTED SYSTEM FOR MONITORING
THE TECHNICAL STATE OF AN ELECTRIC
ENCEPHALOGRAPH BASED ON A FUNCTIONAL GENERATOR

15

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Kharitonov V.V., Zinkin V.N., Dragan S.P.
DYNAMICS OF THE ACOUSTIC ENVIRONMENT
IN THE COCKPIT OF THE AIRCRAFT

20

Efremov A.S., Ivanov A.V., Lukichev L.V.
DETERMINATION OF METROLOGICAL WORKS ORGANIZATION
QUALITY INDICATORS IN DECENTRALIZED DISTRIBUTED
SYSTEM OF METROLOGICAL BODIES

30

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Ryblova E.A., Volkov V.S.
OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE SEMICONDUCTOR
SENSOR ELEMENT IN THE FORM OF A CIRCULAR MEMBRANE
IN ORDER TO INCREASE THE SENSITIVITY

39

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Bunygin E.V., Chaykovskiy V.M.

ROBOTICK HAND CONTROL UNIT

47

Kramm M.N.

BIOELECTRIC FEATURES OF TRANSITION
TO EQUIVALENT ELECTRIC HEART GENERATOR
FOR NON-INVASIVE ELECTROCARDIODIAGNOSTICS

53

Nefed'ev A.I., Nefed'ev D.I., Bezborodov S.A., Gusev V.G.

CONTROL OF THE DRIVER'S CONDITION WHILE DRIVING A CAR

60

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

Leonidov N.V., Mitina M.V.

IMAGE OF LOW-ORBITAL ADDITION
TO ORBITAL CONSTELLATION GLONASS SYSTEM

66

Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S., Zdobnov S.A., Koltin D.N.

ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR FOR GAS TURBINE ENGINE

71

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 621.311

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-1

МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНТРОПИЯ И ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

**В. К. Федоров¹, И. Е. Пестрикова², И. В. Федоров³,
Е. В. Аношенкова⁴, Д. В. Федоров⁵**

^{1,2,3,4} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

⁵ АО «Газпромнефть-ОНПЗ»

^{1,2,3,4,5} pestrikova_omgt@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одной из важных научных проблем теории электротехнической системы является решение задачи предсказания поведения изучаемых показателей качества электроэнергии во времени и фазовом пространстве на основе определенных знаний о начальном состоянии электротехнических систем. Эта задача сводится к нахождению некоторого закона, который позволяет по имеющейся информации об электротехнических системах в начальный момент времени t_0 в точке x_0 фазового пространства определить его будущее в любой момент времени $t > t_0$. *Материалы и методы.* Математическая модель электротехнической системы представляет собой детерминированную систему нелинейных дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями, решение которой ведет себя непредсказуемым и случайным образом – такой тип решения называется режимом детерминированного хаоса, и это новый тип и особая форма поведения электротехнических систем. В данной работе энтропия и ее максимизация рассматриваются в связи с различными возможными траекториями движения хаотической системы в фазовом пространстве между двумя точками (ячейками). Максимизация энтропии приводит к распределению вероятности выбора траектории как функции действия, из которой можно легко получить вероятность перехода электротехнической системы из одного состояния в другое. *Результаты.* Интересным результатом исследования является то, что наиболее вероятные траектории – это просто пути наименьшего действия. Это говорит о том, что принцип наименьшего действия в вероятностной ситуации эквивалентен принципу максимизации энтропии или неопределенности, связанной с тем или иным распределением вероятности. *Выводы.* Вывод исследования заключается в том, что скорее всего траектории движения – это пути наименьшего действия. Таким образом, в вероятностной ситуации принцип наименьшего действия равнозначен принципу максимизации энтропии или неопределенности, которая связана с разнообразным распределением вероятностей.

Ключевые слова: энтропия, энтропийная неустойчивость, принцип максимизации энтропии, принцип наименьшего действия, траектории движения, пути наименьшего действия, распределение вероятностей, нелинейное уравнение, неравновесная система, фазовое пространство, точка бифуркации, флуктуации, итерация, местная положительная обратная связь, электротехническая система

Для цитирования: Федоров В. К., Пестрикова И. Е., Федоров И. В., Аношенкова Е. В., Федоров Д. В. Максимальная энтропия и принцип наименьшего действия для электротехнических систем в режиме детерминированного хаоса // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 5–14. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-1

MAXIMUM ENTROPY AND THE PRINCIPLE OF LEAST ACTION FOR ELECTRICAL SYSTEMS IN THE MODE OF DETERMINISTIC CHAOS

V.K. Fedorov¹, I.E. Pestrikova², I.V. Fedorov³, E.V. Anoshenkova⁴, D.V. Fedorov⁵

^{1,2,3,4} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

⁵ Gazpromneft-ONPZ JSC

^{1,2,3,4,5} pestrikova_omgt@inbox.ru

Abstract. *Background.* One of the important scientific problems of the theory of the electrical system topic is the solution of the problem of predicting the behavior of the studied indicators of electricity quality in time and phase space based on certain knowledge about the initial state of EFV. This task is reduced to finding some law that allows, according to available information about EFV at a partial time t_0 at the point x_0 of the phase space, to determine its future at any time $t > t_0$. *Materials and methods.* The mathematical model of the electrical system is a co-deterministic system of nonlinear differential equations with given initial conditions, the solution of which behaves unpredictably and randomly – this type of solution is called the mode of deterministic chaos and this is a new type and a special form of ETS behavior. In this work, entropy and its maximization are considered in connection with various possible trajectories of the movement of a chaotic system in the phase space between two points (cells). Maximization of entropy leads to a distribution of the probability of choosing a trajectory as a function of action, from which the probability of a transition of an electrical system from one state to another state can be easily obtained. *Results.* An interesting result of the study is that the most believable trajectories are simply the paths of least action. This suggests that the principle of least action in a probabilistic situation is equivalent to the principle of maximizing entropy or uncertainty associated with a particular probability distribution. *Conclusions.* The conclusion of the study is that, most likely, motion paths are the least action paths. Thus, in a probabilistic situation, the principle of least action is equivalent to the principle of maximizing entropy or uncertainty, which is associated with a diverse probability distribution.

Keywords: entropy, entropy instability, entropy maximization principle, least action principle, motion trajectories, least action paths, probability distribution, nonlinear equation, non-equilibrium system, phase space, bifurcation point, fluctuations, iteration, local positive feedback, electrical system

For citation: Fedorov V.K., Pestrikova I.E., Fedorov I.V., Anoshenkova E.V., Fedorov D.V. Maximum entropy and the principle of least action for electrical systems in the mode of deterministic chaos. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2:5–14. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-1

Введение

В ситуации далекой от равновесия дифференциальные уравнения, моделирующие тот или иной природный процесс, становятся нелинейными, а нелинейное уравнение обычно имеет более чем один тип решений. Поэтому в любой момент времени может возникнуть новый тип решения, не сводимый к предыдущему, а в точках смены типов решений – в точках бифуркации – может происходить смена фазовой пространственно-временной организации объекта [1].

Вдали от равновесия каждая подсистема «видит» всю систему целиком. Следовательно, лишь в *неравновесной системе* могут иметь место уникальные события и флуктуации, способствующие этим событиям, а также происходит расширение масштабов системы, повышение ее чувствительности к внешнему миру и, наконец, возникает историческая перспектива, т.е. возможность появления других, быть может, более совершенных, форм организации. И, помимо всего этого, возникает новая категория феноменов, именуемых аттракторами [2].

Принцип максимизации энтропии (ПМЭ), сформулированный в наиболее краткой форме, гласит: если делаются выводы на основе неполной информации (в условиях неопределенности (энтропии)), то необходимо опираться на такое распределение вероятностей, которое имеет максимальную энтропию, допускаемую априорной неполной информацией [3].

Задача обоснования и применения ПМЭ и тем самым энтропийного подхода в статистическом анализе показателей качества режимов функционирования электротехнической системы (ЭТС) решается в предположении, что ЭТС в целом обладает сравнительно устойчивыми и продолжительными уровнями нагрузки [4]. Кратковременными динамическими режимами нагрузки пренебрегают. Показатели качества электроэнергии (ПКЭ) как случайные величины

имеют ограниченные по величине дисперсии, что соответствует физической природе процессов в ЭТС. Оценка отклонений ΔH энтропии от максимальной величины при анализе качества функционирования ЭТС имеет важное значение [5].

Причинами хаоса в электротехнической системе является наличие местной положительной обратной связи и наличие нелинейных элементов с круто падающей вольтамперной характеристикой (отрицательное сопротивление).

Целью данной работы является определение взаимосвязи между максимальной энтропией и принципом наименьшего действия на основе анализа распределения вероятностей движения по различным траекториям движения ЭТС в режиме детерминированного хаоса, движущейся между двумя точками в фазовом пространстве.

Энтропия и ее максимизация рассматриваются в связи с различными возможными траекториями хаотической системы, движущейся в ее фазовом пространстве между двумя ячейками. Фазовое пространство системы определяется так, что точка в ней представляет собой состояние системы.

Рассмотрим неравновесную электротехническую систему, движущуюся в фазовом пространстве между двумя точками a и b , которые находятся в двух элементарных ячейках данного разбиения фазового пространства (рис. 1). Если движение электротехнической системы является регулярным, то между двумя точками будет только одна возможная траектория. В другом случае будет только некоторый однозначный набор траекторий между начальной и конечной ячейками. Эти траектории являются путями, минимизирующими действие по принципу наименьшего действия [2], и имеют определенную вероятность появления. Любой другой набор траекторий движения должен иметь нулевую вероятность.

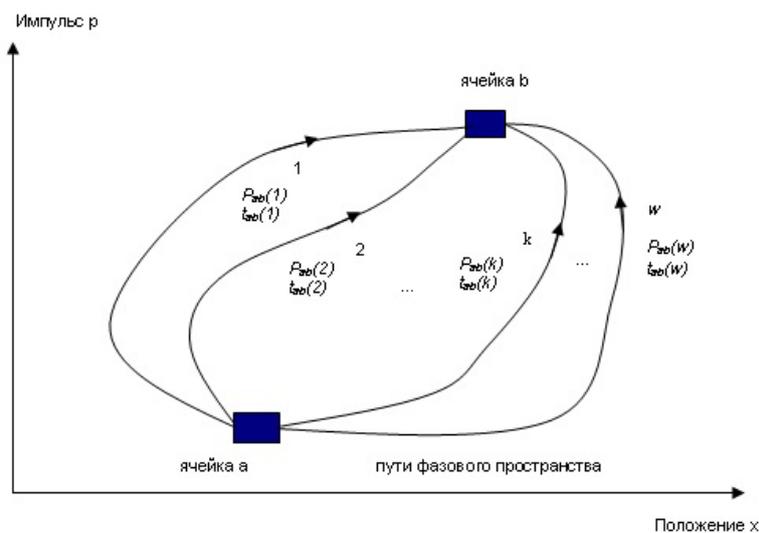


Рис. 1. Возможные траектории фазового пространства ($k = 1, 2, \dots, w$) для хаотической электротехнической системы, чтобы пройти от точек в фазовой ячейке a к точкам в фазовой ячейке b в течение времени $t_{ab}(k)$ (вдоль пути k)

Для ЭТС, находящейся в хаотическом движении, все обстоит иначе. Две точки, неразличимые в начальной ячейке, могут экспоненциально отдаляться друг от друга. Обычно эти две точки после их ухода из начальной ячейки никогда не встретятся в конечной ячейке в фазовом пространстве. Тем не менее, возможно, что они проходят через одну и ту же ячейку в два разных момента времени. Таким образом, между двумя заданными фазовыми ячейками, представленными на рис. 1 буквами a и b соответственно, может быть много возможных траекторий, помеченных k ($k = 1, 2, \dots, w$), с различным временем прохождения $t_{ab}(k)$ электротехнической системы и различной вероятностью $p_{ab}(k)$ для электротехнической системы выбрать путь k . Это называется распределением вероятностей траектории [2].

Распределение вероятностей траектории определяется следующим образом. Предположим, что ансамбль большого числа L идентичных электротехнических систем движется в фазовом пространстве от ячейки a к ячейке b с w возможными траекториями [6]. Таким образом,

вероятность $p_{ab}(k)$ того, что электротехническая система выберет путь k , определяется как обычно в теории вероятностей выражением $p_{ab}(k) = \frac{L_k}{L}$. Естественно, что $\sum_{k=1}^w p_{ab}(k) = 1$.

По определению, $p_{ab}(k)$ – это вероятность перехода из состояния a в состояние b по любой траектории k .

В данной работе распределение вероятностей траектории из-за динамической неустойчивости изучается в связи с теорией энтропийной неустойчивости и принципом наименьшего действия. Прежде всего мы предполагаем, что различные траектории неравновесных электротехнических систем, движущихся между фазовыми ячейками a и b , однозначно дифференцируются по их действию, определяемому [7] как

$$A_{ab}(k) = \int_{t_{ab}(k)} L_k(t) dt, \quad (1)$$

где $L_k(t)$ – лагранжиан системы в момент времени t вдоль пути k и определяется как $L_k(t) = U_k(t) - V_k(t)$, где $U_k(t)$ – общая кинетическая энергия и $V_k(t)$ – полная потенциальная энергия электротехнической системы.

Интеграл $A_{ab}(k)$ определяется по пути k за время $t_{ab}(k)$, $t_{ab}(k)$ – время в пути системы L_k по пути k . Если пути k могут быть идентифицированы только по величине их действий, тогда можно будет изучить их распределения вероятностей с помощью энтропийной концепции и метода максимальной энтропии В. К. Федорова [8] с учетом величины действия $A_{ab}(k)$. Этот подход приведет нас к вероятностной интерпретации механического принципа Мопертюи и распределения вероятностей в зависимости от действия. В качестве приложения полученное распределение вероятностей траектории будет использовано для получения вероятности перехода $P_{ab}(k)$.

Энтропия траектории

Энтропия является нашим незнанием рассматриваемой системы. Чем больше мы знаем о системе, тем меньше энтропия. Согласно Шеннону [9], эту энтропию можно измерить по формуле $S = -\sum_i p_i \ln p_i$, где p_i – определенная вероятность, приписанная ситуации i . Обычно нормируется $\sum_i p_i = 1$ с суммированием по всем возможным ситуациям.

Теперь для ансамбля из w возможных путей на рис. 1 энтропия Шеннона может быть определена следующим образом:

$$H(a,b) = -\sum_{k=1}^w p_{ab}(k) \ln p_{ab}(k). \quad (2)$$

Функция $H(a,b)$ является *энтропией о пути* и должна интерпретироваться как недостающая информация, необходимая для предсказания того, какой путь из ансамбля система выберет из a в b . Согласно нашему исходному предположению, величина, которая дифференцирует пути и вероятность их появления, является лагранжевым действием.

Распределение вероятности максимальной энтропии

Рассматривается ансамбль, содержащий большой комплекс систем, перемещающихся из a в b . Эти системы распределены по w путям согласно $p_{ab}(k)$ в связи с действием $A_{ab}(k)$. Математическое ожидание действия по всем возможным путям может быть рассчитано с помощью

$$M(A_{ab}) = \sum_{k=1}^w p_{ab}(k) A_{ab}(k). \quad (3)$$

С другой стороны, энтропия $H(a,b)$ о пути в формуле (2) является выпуклой функцией в зависимости от нормированной вероятности $p_{ab}(k)$. Согласно принципу В. К. Федорова [8], чтобы получить оптимальное распределение, необходимо максимизировать $H(a,b)$ при ограничениях, связанных с нашими знаниями о системе и соответствующих случайных величинах, т.е. с нормировкой $p_{ab}(k)$ и математическим ожиданием A_{ab}

$$\delta \left[-H(a,b) + \alpha \sum_{k=1}^w p_{ab}(k) + \eta \sum_{k=1}^w p_{ab}(k) A_{ab}(k) \right] = 0. \quad (4)$$

Это приводит к следующему распределению вероятностей:

$$p_{ab}(k) = \frac{1}{Q} \exp[-\eta A_{ab}(k)]. \quad (5)$$

Поместив это распределение вероятностей (5) в $H(a,b)$ соотношения (2), получаем

$$H(a,b) = \ln Q + \eta A_{ab} = \ln Q - \eta \frac{\partial}{\partial \eta} \ln Q, \quad (6)$$

где Q определяется, как $Q = \sum_{k=1}^w \exp[-\eta A_{ab}(k)]$, и A_{ab} определяется выражением

$$A_{ab} = -\frac{\partial}{\partial \eta} \ln Q, \quad (7)$$

где α, η – множители Лагранжа.

Устойчивость распределения вероятностей траекторий

Теперь покажем, что указанное распределение вероятностей устойчиво по отношению к флуктуации действия. Предположим, что каждый путь разрезан на две части: 1-я часть (сегменты на стороне ячейки a) и 2-я часть (сегменты на стороне b). Все сегменты 1-й части содержатся в группе 1, а все сегменты 2-й части в группе 2. Каждая группа имеет энтропию траектории $H_1 = H_2 = H$ и среднее действие $A_1 = A_2 = A$. Тогда общая энтропия $H(a,b) = H_1 + H_2 = 2H$ и общее среднее действие $A(a,b) = A_1 + A_2 = 2A$. Если рассмотреть небольшую вариацию разделения траекторий с виртуальными изменениями в двух группах, такие, что $\delta A_1 = \delta A = -\delta A_2$, то общая энтропия будет изменена и может быть записана как

$$H'(a,b) = H(A + \delta A) + H(A - \delta A). \quad (8)$$

В связи с тем, что распределение (5) и соотношение (6) являются следствием процедуры максимизации энтропии, условие стабильности требует, чтобы энтропия не увеличивалась с виртуальными изменениями указанных двух групп. При этом необходимо иметь

$$\delta H = H'(a,b) - H(a,b) \leq 0, \quad (9)$$

т.е.

$$H(A + \delta A) + H(A - \delta A) - 2H(A) \leq 0, \quad (10)$$

что означает

$$\frac{\partial^2 H}{\partial A^2} \leq 0. \quad (11)$$

Рассмотрим, всегда ли выполняется это условие энтропийной устойчивости. Из уравнения (6) следует, что $\frac{\partial^2 H}{\partial A^2} = \frac{\partial \eta}{\partial A}$. Затем, учитывая определение среднего действия (выражение (3)), рассчитаем

$$\frac{\partial A}{\partial \eta} = -\partial^2, \quad (12)$$

что подразумевает

$$\frac{\partial^2 H}{\partial A^2} = -\frac{1}{\delta^2} \leq 0, \quad (13)$$

где дисперсия $\delta^2 = A_1^{-2} + A_2^{-2} \geq 0$ характеризует флуктуации действия A .

Это доказывает стабильность максимального распределения энтропии и соотношения (5) относительно флуктуации действия по различным траекториям.

Приложение к режимам детерминированного хаоса ЭТС

Возможный физический смысл η можно понять на специальном примере ЭТС. Предположим, что на рис. 1 определен путь, по которому элементы ЭТС движутся от a к b через промежуточную точку или ячейку k . Действие $A_{ab}(k)$ элементов ЭТС от a до b можно рассчитать как [10]

$$A_{ab}(k) = \frac{(x_k - x_a)^2}{2(t_k - t_a)} + \frac{(x_b - x_k)^2}{2(t_b - t_k)}. \quad (14)$$

Тогда из соотношения (5) имеем

$$p_{ab}(k) = \frac{1}{Q} \exp\left[-\eta \frac{(x_k - x_a)^2}{2(t_k - t_a)}\right] \exp\left[-\eta \frac{(x_b - x_k)^2}{2(t_b - t_k)}\right]. \quad (15)$$

С другой стороны, известно [8], что в качестве решения уравнения диффузии вероятность перехода элементов из a в b через путь k равна

$$p_{ab}(k) = p_{ak} p_{kb} = \frac{1}{[4\pi D(t_k - t_a)]^{d/2}} \exp\left[-\frac{(x_k - x_a)^2}{4D(t_k - t_a)}\right] \times \frac{1}{[4\pi D(t_b - t_k)]^{d/2}} \exp\left[-\frac{(x_b - x_k)^2}{4D(t_b - t_k)}\right], \quad (16)$$

где D – коэффициент диффузии, предполагаемый постоянным всюду в фазовом пространстве, t_a , t_k и t_b – время, а x_a , x_k и x_b – координаты положения элемента в точках a , k и b соответственно, d – это размерности обычного конфигурационного пространства, p_{ak} и p_{kb} – вероятности перехода элемента из a в k и из k в b соответственно [11].

Сравнение соотношений (15) и (16) приводит к важному результату

$$\eta = \frac{1}{2D}. \quad (17)$$

Для системы, содержащей большое количество элементов, приведенный выше результат остается в силе. Единственное отличие состоит в том, что в этом случае промежуточных точек будет просто больше, и общее действие будет рассчитываться для всех элементов и их траекторий, каждая из которых имеет большое количество промежуточных точек. Вышеуказанный результат может быть использован для многих хаотических систем.

Принцип максимальной энтропии и принцип наименьшего действия

Обратим внимание на связь между максимальной энтропией траектории и наименьшим действием. Почти все варианты принципа наименьшего действия можно свести к следующей общей форме: действительное состояние или траектория движения физической системы отличаются от всех состояний или траекторий, возможных при данных условиях, тем, что величина действия является стационарной (не меняется во времени) и принимает экстремальное значение. Иначе говоря, система ведет себя таким образом, чтобы ее действие было минимальным из всех возможных при данных условиях [12]. Можно показать, что пути наименьшего действия являются наиболее вероятными при $\eta = \frac{\partial H(a,b)}{\partial A_{ab}} > 0$. В самом деле, из

выражения (5) положительное η означает, что траектории наименьшего действия статистически более вероятны, чем траектории большего действия [13]. Таким образом, наиболее вероятные траектории должны минимизировать действие.

Это свойство распределения вероятностей выражения (5) можно математически обсудить так же, как и стабильность распределения вероятностей. Ранее рассматривались две группы 1 и 2 сегментов пути с $H_1 = H_2 = H$ и $A_1 = A_2 = A$. Общая энтропия тогда $H(a,b) = 2H$, а общее среднее действие $A(a,b) = 2A$. Теперь предположим, что две группы деформированы

так, что $\delta H_1 = \delta H = -\delta H_2$. Общее среднее действие после групповой деформации можно записать в виде [14]

$$A'(a,b) = A_1(H_1 + \delta H_1) + A_2(H_2 + \delta H_2) = A(H + \delta H) + A(H - \delta H). \quad (18)$$

Если распределение вероятностей выражения (5) и соотношение (6) соответствуют наименьшему действию, общее среднее действие после групповой деформации не может уменьшаться: $\delta A = A'(a,b) - A(a,b) \geq 0$, т.е.

$$A(H + \delta H) + A(H - \delta H) - 2A(H) \geq 0, \quad (19)$$

что означает

$$\frac{\partial^2 A}{\partial H^2} \geq 0. \quad (20)$$

С другой стороны, с помощью соотношения (6) мы можем доказать, что

$$\frac{\partial^2 A}{\partial H^2} = -\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial \eta}{\partial H} = -\frac{1}{\eta^3} \frac{\partial \eta}{\partial A}. \quad (21)$$

Сейчас с учетом $\frac{\partial \eta}{\partial A} = -\frac{1}{\delta^2}$ мы получаем

$$\frac{\partial^2 A}{\partial H^2} = \frac{1}{\delta^2 \eta^3}. \quad (22)$$

Мы видим, что если уравнение (22) верно, мы имеем

$$\eta \geq 0. \quad (23)$$

Другими словами, положительность η подразумевает, что принцип максимизации энтропии неразрывно связан с принципом наименьшего действия: *наиболее вероятные траектории, определяемые распределением вероятностей максимальной энтропии, – это просто пути наименьшего действия.*

Принимая во внимание соотношение (17), положительность η обеспечивается за счет положительности коэффициента диффузии D . Мы также можем инвертировать это утверждение: если наиболее вероятные траектории получены из распределения вероятностей (5), которые минимизируют действие, тогда коэффициент диффузии должен быть положительным.

Заключение

Есть надежда, что эта работа может способствовать изучению поведения хаотических систем. Если нет хаоса, то энтропия о пути исчезнет, и между двумя фазовыми ячейками будет только точный набор параллельных траекторий, которые являются путями наименьшего действия с определенной вероятностью возникновения. Чем более рассматриваемая система хаотична, тем больше возможных путей с различными действиями и тем больше энтропия. Таким образом, предполагается, что энтропия о пути $H(a,b)$ может использоваться как мера хаоса, как энтропия Колмогорова – Синая (ЭКС) [15]. Следует отметить, что существует важное различие между $H(a,b)$ и ЭКС. $H(a,b)$ – это энтропия, связанная с различными траекториями движения, относящимися к двум ячейкам в фазовом пространстве, но имеющая произвольно различное время прохождения от ячейки к ячейке. На языке итерации с дискретным временем разные траектории имеют произвольно различное количество шагов итерации. С другой стороны, ЭКС можно определить как энтропию, связанную с различными путями, которые покидают исходную ячейку для произвольного пункта назначения, но с одинаковым временем прохождения, т.е. с тем же числом шагов итерации [7]. Дальнейшие исследования необходимы для выяснения взаимосвязи между этими двумя энтропийными мерами для хаотических систем.

Результат этой работы соответствует формулировке статистической физики по интегралу по путям и идее, что динамические системы можно рассматривать как геодезические пото-

ки на многообразиях в фазовом пространстве [2, 8]. Это очень обнадеживающий результат для метода вычисления энтропии и интегралов действия в разрывном и недифференцируемом пространстве (например, странных аттракторах), в которых результат настоящей работы может использоваться для выведения метода максимального изменения энтропии для динамической системы, движущейся в фрактальном фазовом пространстве [14].

Резюмируя, можно утверждать, что энтропия траекторий определяется для множества возможных путей хаотических систем, движущихся между двумя ячейками в фазовом пространстве. Показано, что различные пути физически идентифицируются их действиями, максимизация энтропии о пути приводит к распределению вероятности выбора траекторий как функции от действия. В качестве специального примера определена вероятность перехода из начального в конечное состояние ЭТС. В этом случае мы показываем, что наиболее вероятные пути, полученные из распределения вероятностей максимальной энтропии, минимизируют действие. Это говорит о том, что принцип наименьшего действия в вероятностной ситуации эквивалентен принципу максимизации энтропии или неопределенности, связанной с распределением вероятности. Этот результат может рассматриваться как аргумент в поддержку этого метода анализа для неравновесных систем.

Список литературы

1. Федоров Д. В., Федоров В. К., Рысев П. В. [и др.]. Режимы детерминированного хаоса в электроэнергетических системах // Инновации. Интеллект. Культура : материалы XVIII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. Тюмень : Библиотечно-издательский комплекс ТюмГНГУ, 2010. С.116–118.
2. Федоров Д. В., Федоров В. К., Федянин В. В. [и др.]. Вторая вариация энтропии как аналог функции Ляпунова в статистическом анализе функциональной устойчивости электроэнергетических систем // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 123–128.
3. Беляев Л. С., Крумм Л. Л. Применимость вероятностных методов в энергетических расчетах // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 2. С. 3–11.
4. Белашев Б. З., Сулейманов В. К. Метод максимума энтропии. Статистическое описание систем // Письма в ЭЧАЯ. 2002. № 6. С. 44–50.
5. Федоров В. К., Рысев Д. В., Федянин В. В. [и др.]. Синхронизация хаотических автоколебаний в пространстве состояний электроэнергетических, электрических и электронных систем как фактор самоорганизации // Омский научный вестник. 2012. № 3. С. 196–205.
6. Wang Q. A. Measuring information growth in fractal phase space // Chaos, Solitons & Fractals. 2004. Vol. 21, iss. 4. P. 893–897.
7. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическое моделирование в биофизике. М. : Наука, 1975. С. 177–193.
8. Федоров В. К. Концепция энтропии в теоретическом анализе пространственно-временной самоорганизации распределенных активных сред и устойчивых диссипативных структур-систем // Омский научный вестник. 2014. № 1. С. 161–166.
9. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423.
10. Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике. М. : Наука, 1981. С. 187.
11. Wang Q. A., Wang R. A true least action principle for damped motion // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1113 (1): SPMCS2017. P. 012003-1–012003-5.
12. Хомяков В. Н. Принцип наименьшего действия в аналитической механике и экономике. Часть 1 // Вестник Тульского филиала Финуниверситета. 2018. № 1. С. 289–295.
13. Мун Ф. Введение в хаотическую динамику. М. : Наука, 1990. 140 с.
14. Хайтун С. Д. Трактовка энтропии как меры беспорядка и ее негативное воздействие на современную научную картину мира // Вопросы философии. 2017. № 2. С. 62–74.
15. Ott E., Grebogi C., Yorke J. Controlling Chaos // Physical review letters. 2015. Vol. 64, iss. 11. P. 1196–1199.

References

1. Fedorov D.V., Fedorov V.K., Rysev P.V. [et al.]. Modes of deterministic chaos in electric power systems. *Innovatsii. Intellekt. Kul'tura: materialy XVIII Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh i studentov = Innovations. Intelligence. Culture: materials of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students.* Tyumen': Bibliotechno-izdatel'skiy kompleks TyumGNGU, 2010: 116–118. (In Russ.)

2. Fedorov D.V., Fedorov V.K., Fedyanin V.V. [et al.]. The second entropy variation as an analogue of the Lyapunov function in the statistical analysis of the functional stability of electric power systems. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2017;5(3): 123–128. (In Russ.)
3. Belyaev L.S., Krumm L.L. Applicability of probabilistic methods in energy calculations. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport = Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport*. 1983;2:3–11. (In Russ.)
4. Belashev B.Z., Suleymanov V.K. The method of maximum entropy. Statistical description of systems. *Pis'ma v EChAYA = Letters to ECHAYA*. 2002;6:44–50. (In Russ.)
5. Fedorov V.K., Rysev D.V., Fedyanin V.V. [et al.]. Synchronization of chaotic self-oscillations in the state space of electric power, electrical and electronic systems as a factor of self-organization. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2012;3:196–205. (In Russ.)
6. Wang Q.A. Measuring information growth in fractal phase space. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2004;21(4):893–897.
7. Romanovskiy Yu.M., Stepanova N.V., Chernavskiy D.S. *Matematicheskoe modelirovanie v biofizike = Mathematical modeling in biophysics*. Moscow: Nauka, 1975:177–193. (In Russ.)
8. Fedorov V.K. The concept of entropy in the theoretical analysis of the space-time self-organization of distributed active media and stable dissipative structures-systems. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2014;1:161–166. (In Russ.)
9. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*. 1948;27:379–423.
10. Blekhnman I.I. *Sinkhronizatsiya v prirode i tekhnike = Synchronization in nature and technology*. Moscow: Nauka, 1981:187. (In Russ.)
11. Wang Q.A., Wang R. A true least action principle for damped motion. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018;1113(1):012003-1–012003-5.
12. Khomyakov V.N. The principle of least action in analytical mechanics and economics. Part 1. *Vestnik Tul'skogo filiala Finuniversiteta = Bulletin of the Tula branch of the Financial University*. 2018;1: 289–295. (In Russ.)
13. Mun F. *Vvedenie v khaoticheskuyu dinamiku = Introduction to chaotic dynamics*. Moscow: Nauka, 1990:140. (In Russ.)
14. Khaytun S.D. The interpretation of entropy as a measure of disorder and its negative impact on the modern scientific picture of the world. *Voprosy filosofii = Questions of philosophy*. 2017;2:62–74. (In Russ.)
15. Ott E., Grebogi C., Yorke J. Controlling Chaos. *Physical review letters*. 2015;64(11):1196–1199.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Кузьмич Федоров

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры электроснабжения
 промышленных предприятий,
 Омский государственный технический
 университет
 (Россия, г. Омск, просп. Мира, 11)
 E-mail: pestrikova_omgt@inbox.ru

Vladimir K. Fedorov

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of sub-department of power supply,
 of industrial enterprises,
 Omsk State Technical University
 (11 Mira avenue, Omsk, Russia)

Ирина Евгеньевна Пестрикова

аспирант,
 Омский государственный
 технический университет
 (Россия, г. Омск, просп. Мира, 11)
 E-mail: pestrikova_omgt@inbox.ru

Irina E. Pestrikova

Postgraduate student,
 Omsk State Technical University
 (11 Mira avenue, Omsk, Russia)

Игорь Владимирович Федоров

кандидат технических наук,
 доцент кафедры прикладной математики
 и фундаментальной информатики,
 Омский государственный технический
 университет
 (Россия, г. Омск, просп. Мира, 11)
 E-mail: pestrikova_omgt@inbox.ru

Igor V. Fedorov

Candidate of technical sciences,
 associate professor of sub-department
 of applied mathematics and fundamental
 computer science,
 Omsk State Technical University
 (11 Mira avenue, Omsk, Russia)

Екатерина Викторовна Аношенкова

старший преподаватель
кафедры теоретической
и общей электротехники,
Омский государственный технический
университет
(Россия, г. Омск, просп. Мира, 11)
E-mail: pestrikova_omgt@inbox.ru

Дмитрий Владимирович Федоров

кандидат технических наук,
главный специалист (энергетик),
АО «Газпромнефть-ОНПЗ»
(Россия, г. Омск, просп. Губкина, 1)
E-mail: pestrikova_omgt@inbox.ru

Ekaterina V. Anoshenkova

Senior lecturer,
sub-department of theoretical
and general electrical engineering,
Omsk State Technical University
(11 Mira avenue, Omsk, Russia)

Dmitry V. Fedorov

Candidate of technical sciences,
chief specialist (power engineer),
Gazpromneft-ONPZ JSC
(1 Gubkin avenue, Omsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

УДК 621.3.089.62

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-2

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Д. Ю. Кетов¹, А. И. Нефедьев²

¹ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

² Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ya_st@bk.ru, ²nefediev@rambler.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При эксплуатации электроэнцефалографов часто возникает проблема контроля технического состояния такого типа оборудования без его отрыва от процесса эксплуатации. Таким образом, актуальной задачей является разработка распределенной измерительной системы для контроля технического состояния электроэнцефалографов. *Материалы и методы.* В настоящее время в основе всех медицинских измерительных приборов, например, электрокардиографов, электроэнцефалографов имеется вычислительная машина (персональный компьютер, микроконтроллер). Вычислительный потенциал таких приборов обычно используется не полностью, что дает возможность реализовать специализированные алгоритмы проверки и калибровки или использовать их в испытательных стендах. Новизна подхода заключается в применении функционального генератора в составе распределенной измерительной системы. *Результаты.* Для контроля технического состояния электроэнцефалографа была разработана распределенная измерительная система на основе функционального DDS-генератора, позволяющая сформировать специализированные сигналы различной формы и длительности. *Выводы.* Функциональный DDS-генератор, работающий в составе распределенной измерительной системы, позволяет проводить испытания с требуемой периодичностью, и с гибким графиком технического обслуживания.

Ключевые слова: электроэнцефалограф, контроль технического состояния, DDS-генератор, формирование сигналов, испытательный сигнал, модель сигнала

Для цитирования: Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И. Распределенная система для контроля технического состояния электроэнцефалографа на основе функционального генератора // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 15–19. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-2

DISTRIBUTED SYSTEM FOR MONITORING THE TECHNICAL STATE OF AN ELECTRIC ENCEPHALOGRAPH BASED ON A FUNCTIONAL GENERATOR

D.Yu. Ketov¹, A.I. Nefed'ev²

¹ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ya_st@bk.ru, ²nefediev@rambler.ru

Abstract. *Background.* During the operation of electroencephalographs, the problem of monitoring the technical state of this type of equipment without interrupting it from the operation process often arises. Thus, an urgent task is the development of a distributed measuring system for monitoring the technical condition of electroencephalographs. *Materials and methods.* At present, all medical measuring devices, for example, electrocardiographs, electroencephalographs, are based on a computer (personal computer, microcontroller). The computational potential of such devices is usually not fully used, which makes it possible to implement specialized verification and calibration algorithms, or use them in test benches. The novelty of the approach lies in the use of a functional generator as part of a distributed measuring system. *Results.* To control the technical state of the electroencephalograph, a distributed measuring system based on a functional DDS generator was developed, which allows the formation of specialized signals of various shapes and durations. *Conclusions.* The functional DDS generator, working as part of a distributed measuring system, allows testing with the required frequency, and with a flexible maintenance schedule.

Keywords: electroencephalograph, technical condition monitoring, DDS-generator, signal generation, test signal, signal model

For citation: Ketov D.Yu., Nefediev A.I. Distributed system for monitoring the technical state of an electric encephalograph based on a functional generator. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;2:15–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-2

В настоящее время в основе всех медицинских измерительных приборов, например, электрокардиографов, электроэнцефалографов имеется вычислительная машина (персональный компьютер, микроконтроллер). Вычислительный потенциал таких приборов обычно используется не полностью, что дает возможность реализовать специализированные алгоритмы проверки и калибровки или использовать их в испытательных стендах. Рассмотрим построение испытательных систем медицинского измерительного оборудования на примере электроэнцефалографа.

Контроль технического состояния электроэнцефалографов проводится в соответствии с методикой поверки и эксплуатационно-технической документацией¹. Для поверки применяются функциональные генераторы ГФ-05, Диатест-4 или другие функциональные генераторы, позволяющие формировать эталонные тестовые сигналы. Данные функциональные генераторы являются автономными устройствами, что усложняет построение испытательных схем с наличием контроля температуры, влажности и т.д. [1, 2] и, таким образом, накладывает некоторые ограничения на их применение. С помощью вышеперечисленных генераторов также невозможно сформировать специализированные сигналы, подобные сигналам головного мозга человека. По этой причине каналы некоторых типов медицинских приборов поверяются при других параметрах сигналов, чем предлагаемые в методике поверки¹.

В связи со сложностью формирования требуемой формы сигнала для проверки характеристик электроэнцефалографов часто применяется низкочастотный генератор сигналов ГФ-05, с помощью которого могут быть сформированы несколько видов испытательных сигналов, но данные сигналы имеют очень большое отличие от реальной электроэнцефалограммы здорового человека. Несколько лучше ситуация с функциональным генератором Диатест-4, в котором испытательный сигнал ЭЭГ-7 запрограммирован в ПЗУ и является неизменяемым.

Для модификации существующего метода испытаний и создания модели тестового сигнала на первом этапе проводились измерения статистических характеристик ЭЭГ отведений (полученных в результате непараметрического сегментирования), и далее формировалась модель испытательного сигнала, расширяя тем самым возможную базу испытательных сигналов. Полученная модель сигнала записывалась в память функционального генератора. В качестве функционального генератора можно использовать любое доступное устройство, позволяющее формировать тестовое воздействие с требуемыми параметрами в соответствии с рекомендациями и индивидуальными методиками. Но, учитывая общую концепцию испытательного стенда, предложенную ранее [3, 4], в качестве функционального генератора будет использоваться генератор, построенный по технологии прямого цифрового синтеза частоты (*DDS*) [5, 6].

DDS-генератор формирует сигнал с перестраиваемыми частотой и фазой из сигнала фиксированной опорной частоты $f_{оп}$ [7–10]. Опорная частота масштабируется путем деления на коэффициент, задаваемый пользователем. Фазовый аккумулятор суммирует текущее значение с приращением числа импульсов тактовой частоты N для формирования частоты, которая связана с опорной частотой $f_{оп}$ выражением

$$f_{вых} = (N/2^M) \cdot f_{оп},$$

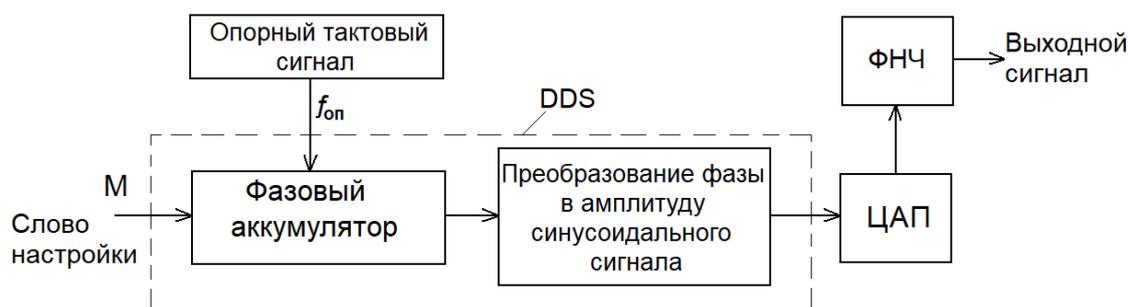
где N – приращение числа импульсов тактовой частоты; M – разрешение слова настройки.

Структурная схема генератора *DDS* приведена на рис. 1. Изменение приращения числа импульсов тактовой частоты N ведет к резкому изменению частоты и фазы выходного сигнала, при этом отсутствуют разрывы фазы и затраты времени на стабилизацию контура.

Данные считываются из памяти в виде цифрового образа сигнала и направляются на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

Тактовая частота ЦАП равна частоте дискретизации генератора и формирует последовательность значений напряжений. Форма выходного сигнала формируется на выходе фильтра низких частот (ФНЧ).

¹ Р 50.2.087-2013 ГСИ. Электроэнцефалографы, электроэнцефалоскопы и электроэнцефалоанализаторы. Методика поверки.

Рис. 1. Структурная схема генератора *DDS*

Формирование сигналов заданной частоты и формы можно обеспечить с помощью генераторов на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), генераторов тактовых сигналов, а также применением программируемых пользователем вентильных матриц (*Field-Programmable Gate Arrays, FPGA*) для задания выходного уровня напряжения ЦАП [11].

Сравнение характеристик указанных алгоритмов построения функциональных генераторов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение технологий синтеза частот

Показатели	ФАПЧ	ЦАП + <i>FPGA</i>	<i>DDS</i>
Цифровая перестройка частоты	Нет	Да	Да
Частота спектра	Высокая	Средняя/высокая	Средняя
Время отклика	Большое	Малое	Малое
Гибкость изменения формы сигнала	Слабая	Средняя	Высокая
Сложность реализации	Средняя	Высокая	Низкая
Стоимость	Средняя	Высокая	Низкая
Габариты	Средние	Большие	Малые
Потребляемая мощность	Высокая	Высокая	Низкая

Недостатки указанных алгоритмов заключаются в невозможности цифровой перестройки частоты, а также большом времени отклика в системах генерации сигналов на основе ФАПЧ, что ограничивает возможность получения быстрой псевдослучайной перестройки частоты, например, в системах с частотной и фазовой манипуляцией. Построение генераторов на основе ЦАП + *FPGA* приводит к увеличению потребляемой мощности, сложности реализации, большим габаритам и, как следствие, к высокой стоимости. Технология *DDS* (прямой цифровой синтез частоты) имеет преимущества благодаря возможности цифровой перестройки частоты, малому времени отклика, низкой сложности реализации и низкой стоимости, малым габаритам и потребляемой мощности.

На основе анализа достоинств и недостатков рассмотренных алгоритмов синтеза сигналов в разрабатываемом испытательном стенде был выбран метод прямого цифрового синтеза *DDS* для построения функционального генератора.

В предложенной системе функции обработки, формирования испытательного сигнала и вывода результатов на экран монитора выполняются программным обеспечением контролируемого электроэнцефалографа. Цифроаналоговое преобразование сигнала, модель которого сформирована программным обеспечением, выполняется аппаратной частью электроэнцефалографа. При этом блоки прибора, формирующие тестовый сигнал по сформированным моделям, образуют автоматизированную испытательную систему, полностью повторяющую все функции генераторов (ГФ-05, Диатест-4, и т.д.), применяемых при проведении периодического контроля электроэнцефалографов. Благодаря возможности формирования точных моделей сигналов головного мозга человека полученная система обладает существенно большей гибкостью и функциональностью по сравнению с генераторами ГФ-05 и Диатест-4.

Применение модулей АЦП/ЦАП и компьютера с установленным специализированным программным обеспечением значительно расширяет возможности измерений характеристик электроэнцефалографов в реальных условиях. Разделение аппаратных и программных ресурсов позволяет строить распределенные измерительные системы, в узлах сбора данных кото-

рых располагаются блоки АЦП/ЦАП, подключаемые к компьютеру через поверочное коммутационное устройство электроэнцефалографа (ПКУ). Сигналы от всех блоков поступают в компьютер и обрабатываются параллельно. На рис. 2 представлена распределенная измерительная система, предназначенная для измерения характеристик электроэнцефалографа.



Рис. 2. Распределенная измерительная система

Таким образом, можно выделить следующие преимущества данной распределенной измерительной системы:

- 1) возможность формирования с помощью функционального *DDS*-генератора не только стандартных форм сигналов (синусоидальной, прямоугольной), но и сигналов специальной формы, необходимых для испытаний электроэнцефалографа;
- 2) низкие эксплуатационные затраты;
- 3) низкие затраты на проведение испытаний;
- 4) малые размеры;
- 5) возможность работы как в составе системы, так и автономно;
- 6) возможность оперативной передачи измерительных данных.

В результате применения испытательного стенда на основе функционального *DDS*-генератора у инженера появится возможность проводить контроль технического состояния медицинского оборудования практически без отрыва от процесса эксплуатации, что позволит уменьшить время простоя оборудования и сократит трудоемкость проведения контрольных операций. Применение испытательного стенда позволит проводить испытания с требуемой периодичностью и с гибким графиком технического обслуживания.

Список литературы

1. Кетов Д. Ю., Муха Ю. П. Метрологическая схема испытаний энцефалографа // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер.: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2012. № 6, вып. 6. С. 61–64.
2. Кетов Д. Ю., Муха Ю. П. Формирование испытательного сигнала для проверки энцефалографа // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер.: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2014. № 26, вып. 10. С. 102–106.
3. Кетов Д. Ю., Муха Ю. П. Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер.: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2015. № 11, вып. 12. С. 84–88.
4. Кетов Д. Ю., Муха Ю. П., Черножуков М. Л., Либенко С. С. Автоматизированный сетевой программный комплекс, предназначенный для проведения инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа // Телекоммуникации. 2019. № 4. С. 42–48.
5. Murphy E., Colm S. All About Direct Digital Synthesis // Analog Dialogue, 2004. Vol. 38, № 3. P. 8–12.
6. Корнеев С. Простые функциональные генераторы на основе прямого цифрового синтеза // Компоненты и технологии. 2011. № 1. С. 124–125.
7. Метальников А. М. Цифровой синтезатор сигналов произвольной формы // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 1. С. 65–67.
8. ZhengYu Wang, M. C. Frank Chang, Jessica Chiatai Chou. A simple DDS architecture with highly efficient sine function lookup table // GLSVLSI '04: Proceedings of the 14th ACM Great Lakes symposium on VLSI, April 2004. P. 154–157.
9. Liao J. Design of phase adjustable signal generator based on DDS // Journal of Luoyang Normal University. 2014. Vol. 33, № 2. P. 29–32.
10. Zhang G. Research of DDS-based high-precision multichannel signal generation systems // Electronic Measurement Technology. 2014. Vol. 37, № 4. P. 125–129.

11. Shou Y. Z., Zhang H., Ge Y. H. Design and implementation of DDS signal generator based on FPGA // Journal of Jimei University (Natural Science). 2014. Vol. 19, № 5. P. 393–400.

References

1. Ketov D.Yu., Mukha Yu.P. Metrological scheme of encephalograph tests. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'* = Proceedings of the Volgograd State Technical University. Ser.: Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications. 2012;6(6):61–64. (In Russ.)
2. Ketov D.Yu., Mukha Yu.P. Formation of a test signal for checking the encephalograph. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'* = Proceedings of the Volgograd State Technical University. Ser.: Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications. 2014;26(10):102–106. (In Russ.)
3. Ketov D.Yu., Mukha Yu.P. Automated network stand for operational tests of an encephalograph. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'* = Proceedings of the Volgograd State Technical University. Ser.: Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications. 2015;11(12):84–88. (In Russ.)
4. Ketov D.Yu., Mukha Yu.P., Chernozhukov M.L., Libenko S.S. An automated network software package designed for instrumental monitoring of the technical condition of an electroencephalograph. *Telekommunikatsii* = Telecommunications. 2019;4:42–48. (In Russ.)
5. Murphy E., Colm S. All About Direct Digital Synthesis. *Analog Dialogue*. 2004;38(3):8–12.
6. Korneev S. Simple functional generators based on direct digital synthesis. *Komponenty i tekhnologii* = Components and technologies. 2011;1:124–125. (In Russ.)
7. Metal'nikov A.M. Digital synthesizer of arbitrary shape signals. *Pribory i tekhnika eksperimenta* = Instruments and experimental techniques. 2009;1:65–67. (In Russ.)
8. Zheng Yu Wang, M.C. Frank Chang, Jessica Chiatai Chou. A simple DDS architecture with highly efficient sine function lookup table. *GLSVLSI '04: Proceedings of the 14th ACM Great Lakes symposium on VLSI*, April 2004:154–157.
9. Liao J. Design of phase adjustable signal generator based on DDS. *Journal of Luoyang Normal University*. 2014;33(2):29–32.
10. Zhang G. Research of DDS-based high-precision multichannel signal generation systems. *Electronic Measurement Technology*. 2014;37(4):125–129.
11. Shou Y.Z., Zhang H., Ge Y.H. Design and implementation of DDS signal generator based on FPGA. *Journal of Jimei University (Natural Science)*. 2014;19(5):393–400.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Юрьевич Кетов

старший преподаватель
кафедры биотехнических систем и технологий,
Волгоградский государственный медицинский
университет
(Россия, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1)
E-mail: ya_st@bk.ru

Dmitry Yu. Ketov

Senior lecturer,
sub-department of biotechnical systems
and technologies,
Volgograd State Medical University
(1 Pavshikh Bortsov square, Volgograd, Russia)

Алексей Иванович Нефедьев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Alexei I. Nefed'ev

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department
of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 625.098

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-3

ДИНАМИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В КАБИНЕ ЭКИПАЖА ВОЗДУШНОГО СУДНА

В. В. Харитонов¹, В. Н. Зинкин², С. П. Драган³

¹ Филиал «Взлет» Московского авиационного института, Ахтубинск, Россия

² Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил Минобороны России, Москва, Россия

³ Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна, Москва, Россия

¹ haritonovvladimir@yandex.ru, ² zinkin-vn@yandex.ru, ³ s.p.dragan@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы являлось изучение динамики акустической обстановки в кабине летчиков современного фронтового бомбардировщика, обоснование механизмов образования шума на рабочих местах летного состава и выработка рекомендаций по акустической безопасности. *Материалы и методы.* Измерение акустических параметров проводили в кабине экипажа современного фронтового бомбардировщика в наземных условиях при подготовке его к вылету (прогрев двигателя, руление) и при выполнении полетного задания (взлет, горизонтальный полет, посадка). Акустические измерения проводили с помощью цифрового шумомера SVAN-945A (анализатор спектра 1 класса). Установлено, что в кабине воздушного судна образуется шум, который является широкополосным, интенсивным, с максимумом спектра в высокочастотной области и наличием в спектре интенсивного широкополосного инфразвука. В зависимости от этапа измерения эквивалентный уровень шума в кабине колебался от 82 до 106 дБА, а эквивалентный общий уровень звукового давления инфразвука от 90 до 107 дБ Лин. Максимальных значений эти параметры достигали при взлете воздушного судна. Рассмотрены механизмы формирования шума в кабине экипажа. Основным источником его является силовая установка. *Результаты и выводы.* Дана оценка условий труда летчиков по шуму (вредный класс 3.2) и по инфразвуку (допустимый класс 2). Защитный шлем, используемый летчиками, в том числе и как средство индивидуальной защиты от шума, обеспечивает эффективную защиту органа слуха от шума, образующегося в кабине практически на всех этапах, и создает комфортные условия для речевой связи. Результаты мониторинга акустической обстановки на рабочих местах летного состава и механизмы формирования шума должны учитываться при обосновании требований к новым образцам воздушных судов. Улучшение условий труда является одним из способов для снижения риска развития шумовой патологии, сохранения работоспособности и профессионального долголетия летного состава.

Ключевые слова: шум, источники, летный состав, кабина экипажа, механизмы шумообразования, защитный шлем, акустическая безопасность

Для цитирования: Харитонов В. В., Зинкин В. Н., Драган С. П. Динамика акустической обстановки в кабине экипажа воздушного судна // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 20–29. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-3

DYNAMICS OF THE ACOUSTIC ENVIRONMENT IN THE COCKPIT OF THE AIRCRAFT

V.V. Kharitonov¹, V.N. Zinkin², S.P. Dragan³

¹ Vzlet Branch of the Moscow Aviation Institute, Akhtubinsk, Russia

² Central Research Institute of the Air Force of the Ministry of Defense of Russia, Moscow, Russia

³ Federal Medical and Biophysical Center name A.I. Burnazyan, Moscow, Russia

¹ haritonovvladimir@yandex.ru, ² zinkin-vn@yandex.ru, ³ s.p.dragan@mail.ru

Abstract. *Background.* The aim of the work was to study the dynamics of the acoustic situation in the cockpit of a modern front-line bomber (FB), to substantiate the mechanisms of noise generation in the workplaces of flight personnel and to develop recommendations for acoustic safety. *Materials and methods.* The acoustic parameters were measured in the cockpit of a modern front-line bomber under ground conditions when preparing it for departure (engine heating, taxiing) and when performing a flight task (take-off, horizontal flight, landing). Acoustic measurements were performed using a digital noise meter SVAN-945A (class 1 spectrum analyzer). It is established that in the cockpit of the aircraft, noise is formed, which is broadband, intense, with a maximum spectrum in the high-frequency region and the presence of intense broadband infrasound in the spectrum. Depending on the measurement stage, the equivalent cabin noise level ranged from 82 to 106 dBA, and the equivalent total infrasound sound pressure level ranged from 90 to 107 dB Lin. The maximum values of these parameters were reached when the aircraft took off. *Results and conclusions.* The mechanisms of noise formation in the crew cabin are considered. The main source of it is the power plant. An assessment of the working conditions of pilots by noise (harmful class 3.2) and by infrasound (acceptable class 2). The protective helmet used by pilots, including as a means of individual protection against noise, provides effective protection of the hearing organ from noise generated in the cockpit at almost all stages, and creates comfortable conditions for speech communication. The results of monitoring the acoustic environment at the workplace of the aircraft and the mechanisms of noise formation should be taken into account when justifying the requirements for new aircraft models. Improving working conditions is one of the ways to reduce the risk of developing noise pathology, to preserve the working capacity and professional longevity of flight personnel.

Keywords: noise, sources, flight crew, crew cabin, noise generation mechanisms, protective helmet, acoustic safety

For citation: Kharitonov V.V., Zinkin V.N., Dragan S.P. Dynamics of the acoustic environment in the cockpit of the aircraft. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021; 2:20–29. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-3

Актуальность

Авиационный шум (АШ) является одним из ведущих вредных факторов летного состава (ЛС). Вредные и опасные условия труда авиационных специалистов (АС) создают высокие риски развития профессиональных и производственно обусловленных заболеваний, а также повышенного уровня общей заболеваемости и хронических болезней. АШ оказывает негативное влияние на психику человека и приводит к снижению операторских качеств АС, профессиональной работоспособности и надежности деятельности, уровня удовлетворенности трудом и мотивации [1–4].

Авиационный шум – это собирательное понятие, так как он формируется за счет одновременной работы нескольких разнородных шумообразующих механизмов (основные и вспомогательные силовые установки, аэродромная техника). По своему характеру и воздействию АШ – это высокоинтенсивный широкополосный шум, в спектре которого преобладают высокие частоты, с наличием высокоинтенсивной инфразвуковой составляющей, многочасовой, непостоянной, так как шумовое воздействие носит циклический характер в течение летной смены, т.е. периоды активной нагрузки чередуются с паузами от нескольких десятков минут до нескольких часов. Особенности АШ обуславливают ряд проблем, которые необходимо учитывать при планировании развития авиационной техники, мест дислокации авиационных объектов, организации рабочих мест и авиационной безопасности [5].

Основными источниками шума при эксплуатации воздушных судов (ВС) государственной авиации являются силовые установки, планер и средства наземного обеспечения полетов. АШ достигает максимальных значений при взлете. При заходе на посадку шум реактивной струи не является доминирующим источником шума, так как двигатели работают на малом газу, и здесь возникает проблема шума, образующегося при обтекании выпущенного шасси и отклонения элементов механизации крыла. Неблагоприятная акустическая обстановка создается при работе основных и дополнительных силовых установок при подготовке ВС к полету. Механизмы образования шума с учетом многообразия источников требуют тщательного изучения, так как это является важной задачей для снижения шума в источнике или на пути его распространения и неблагоприятных последствий шума на человека и окружающую среду [6, 7].

Нарушение работоспособности в условиях действия АШ является фактором риска, негативно влияющим на профессиональную надежность АС. В связи с этим борьба с шумом требует мониторинга акустической обстановки на рабочих местах АС и проведения профилактических мероприятий для обеспечения безопасности полетов [8, 9].

Цель работы: изучить динамику акустической обстановки в кабине летчиков современного фронтального бомбардировщика (ФБ), обосновать механизмы образования шума на рабочих местах летного состава и дать рекомендации по акустической безопасности.

Материалы и методы исследования

Работа была выполнена с привлечением современного ФБ, широко используемого в настоящее время в Военно-воздушных силах. Акустические измерения проводились в несколько этапов. На первом этапе проведены акустические измерения в наземных условиях в кабине ВС (при прогреве двигателей на малом газу и при рулении) и снаружи около ВС на рабочем месте авиационного техника. На втором этапе измерения выполнялись последовательно при взлете и наборе высоты, горизонтальном полете, заходе на посадку ВС.

Запись начинали с момента запуска двигателя и заканчивали после остановки двигателя ВС. Измерительная аппаратура находилась внутри кабины ВС. Шумомер помещали в нагрудный карман куртки ЛС перед посадкой в кабину ВС.

Измерение акустических параметров проводили с помощью цифрового шумомера SVAN-945A (анализатор спектра 1 класса). Прибор предназначен для акустических измерений, мониторинга шума окружающей среды и оценивания уровней шума на рабочих местах в соответствии с ГОСТ 12.1.050–86 и ГОСТ 22283–88. При обработке результатов в качестве нормативных документов, регламентирующих уровни акустической нагрузки на рабочих местах, использовали:

- санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»;
- санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.583–96 «Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки»;
- санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16;
- общие тактико-технические требования (ОТТ ВВС-2015).

Для оценки звука использовали следующие параметры: максимальный уровень звука (L_A , дБА), эквивалентный уровень звука ($L_{экр}$, дБА), уровень звукового давления (УЗД) в октавных полосах со среднегеометрической частотой 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 40000, 8000 Гц.

Оценку инфразвука (ИЗ) проводили по таким параметрам, как: эквивалентный общий уровень звукового давления ($L_{общ.УЗД}$, дБ), максимальный общий УЗД (L_A , дБ Лин) и УЗД (дБ) в октавных полосах со среднегеометрической частотой 2, 4, 8, 16 Гц.

Для определения характера акустического спектра использовали спектральный анализ и специализированные компьютерные программы.

Субъективную оценку акустической обстановки в кабине ФБ проводили с помощью анкетирования ЛС.

Результаты акустических измерений в кабине экипажа ФБ и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты акустических измерений в диапазоне ИЗ (эквивалентный общий УЗД и максимальный общий УЗД) и в звуковом диапазоне (эквивалентный и максимальный уровень звука) в кабине ФБ на различных этапах выполнения полетного задания.

Таблица 1

Динамика параметров шума в кабине ФБ на разных этапах выполнения полетного задания

Режим полета	Инфразвуковой диапазон		Звуковой диапазон	
	$L_{общ.УЗД}$, дБ Лин	L_A , дБ Лин	$L_{экр}$, дБА	L_A , дБА
Прогрев двигателя	90	107	82	85
Руление	92	101	90	95
Взлет	107	113	106	113
Полет на высоте	101	111	100	111
Весь полет	100	113	99	113

Из табл. 1 следует, что общий УЗД колебался от 90 до 107 дБ Лин, достигая максимальных значений при взлете ВС. Максимальный уровень УЗД находился в диапазоне 101–113 дБ Лин, и он был наибольшим при взлете ВС. Эквивалентный уровень звука колебался от 82 до 106 дБА, достигая максимума при взлете. Максимальный уровень звука находился в диапазоне 85–113 дБА, и он был наибольшим при взлете ВС.

В кабине ВС акустические параметры достигают максимальных значений (113 дБА) при взлете ВС, что обусловлено работой двигателей, соответствующей максимально допустимому числу оборотов и наибольшей тяге двигателя. Взлетному режиму соответствует взлетная мощность, которая составляет практически 100 % номинальной мощности двигателя. Поскольку режим является напряженным, то время работы на нем ограничивается несколькими минутами. В этот период величина акустических параметров существенно превышает предельно допустимый уровень (ПДУ) приблизительно на 21 дБА. В процессе выполнения горизонтального полета на заданной высоте двигатели работают в режиме номинал (75–80 % максимума оборотов), что ведет к снижению шума в кабине ВС (до 100 дБА) и ИЗ (101 дБ Лин). Эти параметры превалируют в интегральной структуре шума и ИЗ (графа «весь полет» табл. 1), так как от общего времени выполнения полетного задания на горизонтальный полет приходится до 90 % общего времени. На этапе «руления после посадки» акустические параметры еще больше снижаются из-за перехода работы двигателя на режим малый газ (ниже 65 % максимума оборотов).

Таким образом, режим работы авиационных двигателей на всех этапах полета определяет уровень шума в кабине ВС. Поэтому силовую установку ВС надо рассматривать в качестве основного источника шума на рабочем месте ЛС.

На основании профессиональной циклограммы установлено, что в кабине ВС в течение всего полета эквивалентный уровень шума соответствует 99 дБА, что превышает на 12 дБА ПДУ (85 дБА), установленным ОТТ ВВС. Условия труда при таком превышении шума соответствуют вредному классу труда 3.2. В области ИЗ эквивалентный общий УЗД не превышал ПДУ (110 дБ Лин в соответствии СанПиН 2.2.4.3359–16 для транспортных средств). Поэтому условия труда по ИЗ соответствуют допустимому классу 2. Максимальный текущий общий уровень инфразвука был максимальным при взлете ВС и не превышал ПДУ (120 дБ). Максимальные уровни звука незначительно превышали ПДУ (110 дБА) при взлете (на 2 дБА) и в течение всего полета (на 1 дБА).

Из этого следует, что летные экипажи фронтовых бомбардировщиков осуществляют профессиональную деятельность во вредных шумовых условиях, т.е. подвергаются некомпенсированной акустической нагрузке, а это создает риски развития шумовой патологии, в первую очередь нейросенсорной тугоухости (НСТ) [10–12].

В табл. 2 представлены УЗД в октавных полосах звукового диапазона в кабине ФБ во время выполнения полетного задания.

Таблица 2

Результаты измерения шума в звуковом диапазоне в кабине ФБ
во время выполнения полетного задания

Место измерения	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрической частотой (Гц)								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Во время полета	80	86	90	90	91	94	92	91	89
Около ВС на стоянке	99	102	103	105	107	107	108	113	116
ПДУ	110	99	92	86	83	80	78	76	74

Примечания:

1. Жирным курсивом выделены величины, превышающие ПДУ.
2. ПДУ для ВС при 4–8-часовой продолжительности полета согласно ОТТ ВВС-2015.

Из табл. 2 следует, что во время полета в кабине ВС УЗД во всех октавах звукового диапазона не превышал 100 дБ и колебался от 80 до 94 дБ. В октавных полосах от 250 до 8000 Гц его величина выше ПДУ от 4 до 15 дБ. Максимум энергетического спектра соответствует 1000–2000 Гц (УЗД 92–94 дБ). Следовательно, в кабине ВС шум представлен во всех октавах, что позволяет его классифицировать как широкополосный. Шум интенсивный, так как не пре-

вышает УЗД 100 дБ. Шум высокочастотный ибо максимум спектра приходится на область от 1 кГц и выше. Широкополосный, интенсивный шум с максимумом спектра в высокочастотной области по своей природе имеет сходство с воздушным реактивным шумом, который образуется при работе силовой установки ВС. Для подтверждения в табл. 2 представлены результаты измерения шума около ВС на стоянке при работающих двигателях. УЗД в этом случае существенно превышают УЗД в кабине на 11–27 дБ, достигая максимального ослабления в области 4–8 кГц. Надо учитывать, что шум в наземных условиях поступает в кабину двумя путями: как структурный шум, распространяясь по конструкции фюзеляжа, и за счет образования внешнего шума вокруг планера за счет работы силовой установки. При полете последний путь значения практически не имеет, так как вокруг планера образуются вихревые воздушные потоки, которые образуют аэродинамический шум. Для него характерен низкочастотный спектр.

В табл. 3 представлены результаты измерения в области ИЗ на рабочих местах ЛС во время выполнения полетного задания ФБ.

Таблица 3

Результаты измерения ИЗ в кабине экипажа ФБ во время полета

Место измерения	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами (Гц)			
	2	4	8	16
Во время полета	58	75	79	80
Около ВС на стоянке	94	94	95	96
ПДУ	110	105	100	95

П р и м е ч а н и я:

1. Жирным курсивом выделены величины, превышающие ПДУ.
2. ПДУ для ВС при 4–8-часовой продолжительности полета согласно ОТТ ВВС-2015.

Из табл. 3 следует, что во время полета в кабине ВС УЗД во всех октавных полосах ИЗ колеблется от 58 до 80 дБ, что существенно ниже ПДУ. Максимум энергетического спектра соответствует 8–16 Гц (УЗД 79–80 дБ). Следовательно, в кабине ВС ИЗ представлен во всех октавах, что позволяет его классифицировать как широкополосный. В табл. 3 представлены результаты измерения ИЗ около ВС на стоянке при работающих двигателях. УЗД в этом случае существенно превышают УЗД в кабине на 16–36 дБ, достигая максимального ослабления в области 2 Гц. Из полученных данных следует, что кабина ВС хорошо защищена от внешнего ИЗ. Этому способствует ряд конструктивных особенностей кабины ВС (герметичность, бронезащита кабины, большая масса капсулы кабины, цилиндрическая форма, высокая звукоотражающая способность металлического корпуса). Перечисленные факторы соответствуют основным требованиям для обеспечения эффективной звукоизоляции, особенно в области ИЗ.

Согласно требованиям руководящих документов персонал при работе в условиях шума, превышающих ПДУ, должен использовать средства защиты. В настоящее время ЛС во время полетов использует защитный шлем (ЗШ), одна из функций которого является защита органа слуха от шума. В табл. 4 представлены сведения об эффективности ЗШ и проведено сравнение ее с величиной превышения шума в кабине ФБ.

Таблица 4

Оценка эффективности ЗШ с величиной превышения ПДУ шума, образующегося в кабине ФБ при полете

Наименование	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрической частотой (Гц)								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Разница между УЗД в кабине ВС и ПДУ (Δ)*	–	–	2	4	8	14	14	15	15
Акустическая эффективность ЗШ			8	9	8	14	14	25	15

П р и м е ч а н и я:

1. * – Δ разница между УЗД снаружи ВС и ПДУ (см. табл. 2).
2. Жирным шрифтом выделены величина звукоизоляции ЗШ, равная или превышающая Δ .

Из табл. 4 следует, что в кабине ВС УЗД шума превышают ПДУ в октавных полосах от 125 до 8000 кГц на 2–15 дБ. Величина звукоизоляции ЗШ в октавных полосах с частотой 125–8000 Гц превышает или равна разнице между УЗД шума, образующегося в кабине ВС во время полета, и ПДУ. Как видно, ЗШ в полном объеме обеспечивает защиту органа слуха в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц практически на всех этапах полета. Однако при взлете ВС уровни шума достигают максимальных значений в звуковом и инфразвуковом диапазонах, поэтому их уровни в кабине экипажа будут превышать акустическую эффективность ЗШ. Акустическая нагрузка на орган слуха в этот период резко увеличивается за счет максимального уровня звука (113 дБА) и максимального общего УЗД (113 дБ Лин), но это продолжается в течение нескольких минут.

Таким образом, наличие высокого уровня шума в кабине ВС при выполнении большей части полетного задания требует от ЛС обязательного использования ЗШ для защиты воздушного и костного путей поступления шума к органу слуха с целью профилактики развития шумовой патологии, в первую очередь нейросенсорной тугоухости (НСТ) [13, 14].

В то же время целенаправленное обследование показало, что у 74 % ЛС выявлены изменения на аудиограммах в виде повышения порогов восприятия звуков, а клинический диагноз НСТ установлен у 28 % ЛС. НСТ в структуре ЛОР-заболеваемости и дисквалификации ЛС занимает ведущее место в государственной и гражданской авиации [15]. Полученные данные свидетельствуют, что воздействие шума приводит к развитию специфической патологии слуха – профессиональной НСТ. Кроме того, наличие в спектре АШ низких частот и ИЗ (свыше 100 дБ Лин) и отсутствие средств защиты от них должны рассматриваться как фактор риска развития экстрауральной патологии у ЛС [16–18]. Следовательно, шум, которому подвергается ЛС в процессе профессиональной деятельности, создает риск для здоровья.

В табл. 5 представлены результаты субъективной оценки ЛС акустической обстановки во время выполнения полетного задания ВС. Такая оценка была проведена среди летного состава методом анкетирования. В анкетировании приняло участие 15 летчиков.

Таблица 5

Субъективная оценка ЛС акустической обстановки во время полета

Вопрос	Фронтальной бомбардировщик
Характеристика спектра шума	Высокочастотный (свист)
Оценка уровня шума	Более высокий по сравнению с другими типами ФБ
Комфортность акустической обстановки	Комфортная
Ухудшение слуха после полета	Не наблюдается
Влияет ли шум на выполнение полетного задания	Не влияет

Из табл. 5 следует, что шум, образующийся в кабине ВС во время полета, ЛС воспринимается как высокочастотный. Такая оценка совпадает с вышеприведенной спектральной характеристикой шума в кабине ВС (см. табл. 2). При наличии ЗШ шум по оценке ЛС не влиял на выполнение полетного задания и не приводил к ухудшению слуха как во время, так и после полета. Таким образом, результаты анкетирования ЛС подтверждают, что ЗШ субъективно обеспечивает защиту органу слуха от интенсивного шума в кабине ФБ.

Заключение

Исследование динамики акустической обстановки в кабине современного ФБ показало, что на всех этапах выполнения полетного задания присутствует шум, эквивалентный уровень которого колеблется в широких пределах от 82 до 106 дБА в зависимости от этапа измерения. Диапазон изменения уровня шума достаточно широкий и по отношению к ПДУ (85 дБА в соответствии с ОТТ ВВС-2015 для ВС) он может быть ниже и выше. Однако большую часть времени полета уровень шума (99 дБА) превышает ПДУ. На основании акустических измерений и спектрального анализа шум в кабине ФБ надо классифицировать как широкополосный, интенсивный, с максимумом спектра в высокочастотной области и наличием в спектре интенсивного широкополосного ИЗ. Обращает на себя внимание, что шум, генерируемый силовой установкой ФБ, представляет собой сочетание акустических колебаний, которые перекрывают все октавы звукового и инфразвукового диапазонов.

Изучение механизмов образования шума показало, что шум внутри кабины по своей природе имеет сходство с воздушным реактивным шумом, который образуется при работе силовой установки ФБ. Основным источником его образования является структурный шум от работающей силовой установки ВС. Подтверждением этому является изменение уровня шума в кабине в зависимости от колебания мощности силовой установки (табл. 6).

Таблица 6

Корреляционная зависимость между мощностью работы силовой установки ФБ и интенсивностью акустических параметров в кабине экипажа

Параметр	Этап полетного задания			
	прогрев двигателя	руление	взлет	крейсерский полет
Мощность работы силовой установки (%)	65	80	99	90
Уровень звука в кабине ФБ (дБА)	82	90	106	100
Уровень звукового давления (дБ Лин)	90	92	107	101
Коэффициент корреляции	$r_{\text{шума}} = 0,99$ $p < 0,05$ $r_{\text{ИЗ}} = 0,945$ $p < 0,05$			

Из табл. 6 следует, что уровень шума в кабине экипажа ФБ имеет сильную прямую достоверную связь с мощностью работы силовой установки ($r_{\text{шума}} = 0,99$ $p < 0,05$). Коэффициент корреляции для общего УЗД ИЗ был практически таким же ($r_{\text{ИЗ}} = 0,945$ $p < 0,05$).

На это же указывает и тот факт, что кабина ФБ хорошо защищена от внешних источников шума как на земле, так и во время полета. Этому способствуют конструктивные особенности капсулы и кабины экипажа, которые соответствуют основным требованиям для достижения эффективной звукоизоляции. Однако сочетание в авиационном шуме интенсивных (свыше 90 дБ) акустических колебаний звукового и инфразвукового диапазонов создает трудности по выбору методов и способов для его эффективного снижения. Считаем, что перспективным направлением является борьба с шумом в его источнике, т.е. в самой силовой установке. Примером этому является гражданская авиация, где использование дополнительных контуров в турбореактивных двигателях способствовало снижению уровня внешнего шума.

Показано, что условия труда по шуму для ЛС соответствуют классу вредный (класс 3.2), а по ИЗ – классу допустимый (класс 2). Наличие вредных условий труда предполагает риск развития у персонала профессиональных и профессионально обусловленных заболеваний, а также увеличение общей и хронической заболеваемости. Достаточно высокая частота выявления у ЛС тугоухости является доказательством, что АШ является вредным профессиональным фактором. Поэтому для обеспечения акустической безопасности ЛС необходимо проведение профилактических мероприятий, включающих организационно-технические и лечебно-профилактические [19–21].

Ведущее место при борьбе с шумом должно отводиться обеспечению ЛС эффективными средствами индивидуальной защиты от шума. ЗШ в полном объеме обеспечивает защиту органа слуха в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц практически на всех этапах полета. Результаты анкетирования ЛС показали, что ЗШ субъективно обеспечивает достаточную защиту органа слуха от внешнего интенсивного шума в кабине ВС.

Результаты мониторинга акустической обстановки на рабочих местах ЛС и механизмы формирования шума должны учитываться при обосновании требований к новым образцам ВС. Улучшение условий труда является одним из способов для снижения риска развития шумовой патологии, сохранения работоспособности и профессионального долголетия ЛС. Обеспечение надежности профессиональной деятельности ЛС в условиях действия вредных и опасных факторов полета, в том числе шума, является актуальной задачей, влияющей на безопасность полетов.

Список литературы

1. Солдатов С. К., Зинкин В. Н., Богомолов А. В. [и др.]. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. М. : Физматлит, 2019. 216 с.
2. Зинкин В. Н., Шешегов П. М. Современные проблемы шума в авиации // Проблемы безопасности полетов. 2014. № 5. С. 3–25.

3. 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.
4. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Шешегов П. М., Харитонов В. В. Шум как фактор риска снижения работоспособности и профессиональной надежности авиационных специалистов // *Проблемы безопасности полетов*. 2014. № 8. С. 3–28.
5. 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.
6. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Драган С. П., Пирожков М. В. Моделирование аэродинамического шума при заходе самолета на посадку // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2013. № 11. С. 53–60.
7. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Богомоллов А. В., Драган С. П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука // *Технологии гражданской безопасности*. 2015. Т. 12, № 1. С. 90–96.
8. Солдатов С. К., Богомоллов А. В., Зинкин В. Н., Драган С. П. Проблемы обеспечения акустической безопасности персонала авиационной промышленности // *Безопасность труда в промышленности*. 2014. № 10. С. 58–60.
9. Зинкин В. Н., Солдатов С. К., Кукушкин Ю. А. Гигиеническая оценка условий труда работников «шумовых» профессий авиаремонтных заводов // *Медицина труда и промышленная экология*. 2008. № 4. С. 40–42.
10. Свидовый В. И., Зинкин В. Н., Ахметзянов И. М. Оценка риска производственно обусловленных и профессиональных заболеваний у авиационных специалистов // *Профилактическая и клиническая медицина*. 2008. № 1. С. 49–51.
11. Зинкин В. Н., Квасовка В. В., Солдатов С. К. Влияние высокоинтенсивного авиационного шума на заболеваемость инженерно-технического состава Военно-воздушных сил // *Военно-медицинский журнал*. 2008. Т. 329, № 2. С. 59–63.
12. Ушаков И. Б., Ромасюк С. И., Шешегов П. М. Действие авиационного шума на орган слуха специалистов инженерно-технического состава Военно-воздушных сил // *Военно-медицинский журнал*. 2006. Т. 327, № 7. С. 59–62.
13. Зинкин В. Н., Шешегов П. М., Чистов С. Д. Клинические аспекты профессиональной сенсоневральной тугоухости акустического генеза // *Вестник оториноларингологии*. 2015. Т. 80, № 6. С. 65–70.
14. Шешегов П. М., Зинкин В. Н., Дворянчиков В. В. Нейросенсорная тугоухость шумовой этиологии: диагностика, лечение и профилактика // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2015. № 2. С. 60–66.
15. 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.
16. 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.
17. Шешегов П. М., Зинкин В. Н., Харитонов В. А. Шум и инфразвук: ведущие вредные факторы на рабочих местах экипажей армейской авиации // *Проблемы безопасности полетов*. 2020. № 12. С. 21–39.
18. Зинкин В. Н., Свидовый В. И., Ахметзянов И. М. Неблагоприятное влияние низкочастотных акустических колебаний на органы дыхания // *Профилактическая и клиническая медицина*. 2011. № 3. С. 280–284.
19. Харитонов В. В., Зинкин В. Н., Драган С. П., Скуратовский Н. И. Механизмы формирования шума на рабочих местах авиационных специалистов воздушных судов государственной авиации // *Проблемы безопасности полетов*. 2018. № 10. С. 1–17.
20. Пенчученко В. В., Харитонов В. В., Кленков Р. Р., Мищенко А. А. Современные методы исследования акустической обстановки в кабинах воздушных судов // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2019. № 6. С. 48–54.
21. Зинкин В. Н., Харитонов В. В., Солдатов С. К., Драган С. П. [и др.]. Комплексная характеристика условий труда летного состава маневренной авиации по акустическому фактору // *Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики*. 2019. № 4. С. 52–58.

References

1. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V. [et al.]. *Fundamental'nye i prikladnye aspekty aviatsionnoy meditsinskoj akustiki = Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics*. Moscow: Fizmatlit, 2019:216. (In Russ.)

2. Zinkin V.N., Sheshegov P.M. Modern problems of noise in aviation. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety issues*. 2014;5:3–25. (In Russ.)
3. 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.
4. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Sheshegov P.M., Kharitonov V.V. Noise as a risk factor for reducing the efficiency and professional reliability of aviation specialists. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety issues*. 2014;8:3–28. (In Russ.)
5. 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 from the international participation*. Saint-Petersburg, 2017:493–521. (In Russ.)
6. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Dragan S.P., Pirozhkov M.V. Modeling of aerodynamic noise during the approach of the aircraft to landing. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal = Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal*. 2013;11:53–60. (In Russ.)
7. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Dragan S.P. Current problems of protecting the population from low-frequency noise and infrasound. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti = Civil security technologies*. 2015;12(1):90–96. (In Russ.)
8. 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.)
9. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Kukushkin Yu.A. Hygienic assessment of working conditions of employees of "noise" professions of aircraft repair plants. *Medsitina truda i promyshlennaya ekologiya = Occupational medicine and industrial ecology*. 2008;4:40–42. (In Russ.)
10. Svidovyy V.I., Zinkin V.N., Akhmetzyanov I.M. Assessment of the risk of production-related and occupational diseases in aviation specialists. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina = Preventive and clinical medicine*. 2008;1:49–51. (In Russ.)
11. Zinkin V.N., Kvasovka V.V., Soldatov S.K. The influence of high-intensity aviation noise on the morbidity of the engineering staff of the Air Force. *Voенно-meditsinskiy zhurnal = Military Medical Journal*. 2008;329(2):59–63. (In Russ.)
12. Ushakov I.B., Romasyuk S.I., Sheshegov P.M. The effect of aviation noise on the hearing organ of specialists of the engineering and technical staff of the Air Force. *Voенно-meditsinskiy zhurnal = Military Medical Journal*. 2006;327(7):59–62. (In Russ.)
13. Zinkin V.N., Sheshegov P.M., Chistov S.D. Clinical aspects of professional sensorineural hearing loss of acoustic genesis. *Vestnik otorinolaringologii = Bulletin of otorhinolaryngology*. 2015;80(6):65–70. (In Russ.)
14. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Dvoryanchikov V.V. Sensorineural hearing loss of noise etiology: diagnosis, treatment and prevention. *Vestnik Rossiyskoy voенно-meditsinskoy akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2015;2:60–66. (In Russ.)
15. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Slivina L.P. Aviation noise: features of the 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.)
16. 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.)
17. Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Kharitonov V.A. Noise and infrasound: the leading harmful factors in the workplaces of army aviation crews. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety issues*. 2020;12:21–39. (In Russ.)
18. Zinkin V.N., Svidovyy V.I., Akhmetzyanov I.M. Adverse effect of low-frequency acoustic vibrations on the respiratory organs. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina = Preventive and clinical medicine*. 2011;3:280–284. (In Russ.)
19. Kharitonov V.V., Zinkin V.N., Dragan S.P., Skuratovskiy N.I. Mechanisms of noise generation at the workplaces of aviation specialists of state aviation aircraft. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety issues*. 2018;10:1–17. (In Russ.)
20. Penchuchenko V.V., Kharitonov V.V., Klenkov R.R., Mishchenko A.A. Modern methods of studying the acoustic situation in the cabins of aircraft. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal = Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal*. 2019;6:48–54. (In Russ.)
21. Zinkin V.N., Kharitonov V.V., Soldatov S.K., Dragan S.P. [et al.]. Comprehensive characteristics of the working conditions of the flight crew of maneuverable aircraft by the acoustic factor. *Chelovecheskiy faktor: problemy psikhologii i ergonomiki = The human factor: problems of psychology and ergonomics*. 2019;4:52–58. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Васильевич Харитонов

кандидат технических наук,
доцент кафедры испытания 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 sub-department
of aircraft testing,
Vzlet Branch of the Moscow Aviation Institute
of the State Technical University
(5 Dobrolyubova street, Akhtubinsk,
Astrakhan region, Russia)

Валерий Николаевич Зинкин

доктор медицинских наук, профессор,
старший научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории,
Центральный научно-исследовательский институт
Военно-воздушных сил Минобороны России
(Россия, Московская область, г. Щелково)
E-mail: zinkin-vn@yandex.ru

Valery N. Zinkin

Doctor of medical sciences, professor,
senior researcher at the research laboratory,
Central Research Institute of the Air Force
of the Russia Ministry of Defense
(Shchelkovo, Moscow region, Russia)

Сергей Павлович Драган

доктор технических наук, доцент,
заведующий лабораторией,
Федеральный медицинский биофизический
центр имени А. И. Бурназяна
(Россия, г. Москва, ул. Маршала Новикова, 23)
E-mail: s.p.dragan@mail.ru

Sergey P. Dragan

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the laboratory,
Federal Medical Biophysical Center
name A. I. Burnazyan
(23, Marshal Novikov street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

УДК 681.2.089

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ПОВЕРОЧНЫХ ОРГАНОВ

А. С. Ефремов¹, А. В. Иванов², Л. В. Лукичев³

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3} vka@mil.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена важностью задач обеспечения экономической эффективности при организации поверочных работ и в связи с этим необходимостью определения технико-экономических показателей качества обслуживания в системе поверочных органов. Целью работы является анализ и обоснование состава технико-экономических показателей качества организации поверочных работ, разработка и описание подходов к их расчету с учетом структурно-функциональных параметров распределенной системы поверочных органов при децентрализованном обслуживании. *Результаты.* Рассмотрен состав технико-экономических показателей для оценки качества организации и выполнения поверочных работ в децентрализованной системе поверочных органов. Приведено описание и основные расчетные соотношения для определения показателей применительно к распределенной системе источников заявок на обслуживание и поверочных органов, представленных в виде модели сети массового обслуживания. *Выводы.* С использованием рассмотренного подхода могут быть определены технико-экономические показатели качества организации поверочных работ в децентрализованной распределенной системе поверочных органов. Полученные результаты могут быть использованы при сравнительном анализе вариантов, а также при решении оптимизационных задач по организации и планированию поверочных работ.

Ключевые слова: поверочные органы, распределение заявок, поверка средств измерений, сеть массового обслуживания, оперативность, технико-экономические показатели, затраты

Для цитирования: Ефремов А. С., Иванов А. В., Лукичев Л. В. Определение показателей качества организации поверочных работ в децентрализованной распределенной системе поверочных органов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 30–38. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-4

DETERMINATION OF METROLOGICAL WORKS ORGANIZATION QUALITY INDICATORS IN DECENTRALIZED DISTRIBUTED SYSTEM OF METROLOGICAL BODIES

A.S. Efremov¹, A.V. Ivanov², L.V. Lukichev³

^{1,2,3} Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

^{1,2,3} vka@mil.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the importance of the tasks of ensuring economic efficiency in organizing production activities and, in this regard, the need to determine technical and economic indicators of service quality in the system of metrological bodies. The purpose of the work is to analyze and substantiate the composition of the technical and economic indicators of the quality of the organization of production activities, develop and describe approaches to their calculation considering the structural and functional parameters of the distributed system of metrological bodies in decentralized service. *Results.* The composition of technical and economic indicators for evaluation of organization quality and performance of production activities in decentralized system of metrological bodies is considered. The description and basic calculation ratios for determining the indicators for the distributed system of sources of service requests and metrological bodies presented in the form of a model of a mass service network are given. *Conclusions.* Using the considered approach, technical and economic indicators of the quality of organization of production activities in a decentralized distributed system of metrological bodies can be determined. The obtained results can be used in comparative analysis of variants, as well as in solving optimization tasks for organization and planning of production activities.

Keywords: distribution of applications, verification of measuring instruments, queuing network, efficiency, optimization, technical and economic indicators, costs

For citation: Efremov A.S., Ivanov A.V., Lukichev L.V. Determination of metrological works organization quality indicators in decentralized distributed system of metrological bodies. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2:30–38. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-4

Введение

Поверка средств измерений (СИ) производится в аккредитованных в соответствии с законодательством Российской Федерации поверочных органах, входящих в структуру государственной и ведомственных метрологических служб¹. Поверочные работы планируются и организуются, как правило, по территориальному принципу с учетом сложившейся структуры ведомственных метрологических служб, а также с привлечением в случае необходимости и наличия возможности сторонних организаций, аккредитованных на право поверки СИ. При организации поверочных работ возможны две основные схемы – централизованная и децентрализованная. Более гибкой является децентрализованная схема обслуживания, при которой отсутствует жесткое закреплениеверяемых СИ за конкретными поверочными органами, и СИ могут направляться на поверку в любое из доступных на рассматриваемой территории поверочных подразделений. При такой схеме обслуживания более сложными становятся задачи рационального распределения заявок и планирования поверочных работ. Это связано с тем, что становятся взаимозависимыми состояния объектов системы, поэтому при организации поверочных работ необходимо рассматривать систему в целом. При оценке качества организации поверочных работ целесообразно использовать технико-экономические показатели, включающие показатели оперативности и экономические показатели. В данной статье основное внимание уделено рассмотрению ряда стоимостных и вероятностно-временных показателей качества организации поверочных работ с учетом приведенных в работе [1] результатов.

Постановка задачи

Будем рассматривать территориально распределенную систему, в которой имеется множество объектов обслуживания и множество поверочных органов при децентрализованной схеме обслуживания. Объектами обслуживания являются организационно-технические системы, в составе которых эксплуатируются СИ различных типов – источники заявок на обслуживание. Поверочные органы – это подразделения ведомственных и государственной метрологических служб, оснащенные рабочими местами по поверке СИ и имеющие соответствующие области аккредитации.

В общем случае структуру метрологической службы можно представить в виде двухуровневой иерархической системы, где нижний уровень составляют подразделения с ограниченными возможностями по проведению поверки, а верхний уровень – подразделения с более широкими возможностями. СИ преимущественно направляются на поверку в ближайшие поверочные органы нижнего уровня. В случае невозможности или нецелесообразности выполнения поверки в ближайшем подразделении СИ направляются в другое аккредитованное поверочное подразделение либо через поверочный орган нижнего уровня направляются в поверочный орган верхнего уровня. После выполнения поверки СИ возвращаются на свои штатные места. Такую схему обслуживания в обобщенном виде иллюстрирует рис. 1, где совокупность объектов обслуживания и поверочных органов представлена в виде замкнутой сети массового обслуживания.

В такой структуре можно выделить стороны, интересы которых различны: организации – заказчики и исполнители работ – поверочные органы. В составе последних могут быть подразделения одного или разных ведомств или ведомственной и государственной метрологических служб. Поэтому оценку технико-экономических показателей качества организации работ целесообразно производить раздельно для каждой стороны, а суммарные затраты определять для организаций одного ведомства.

¹ Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102-ФЗ от 26.06.2008.

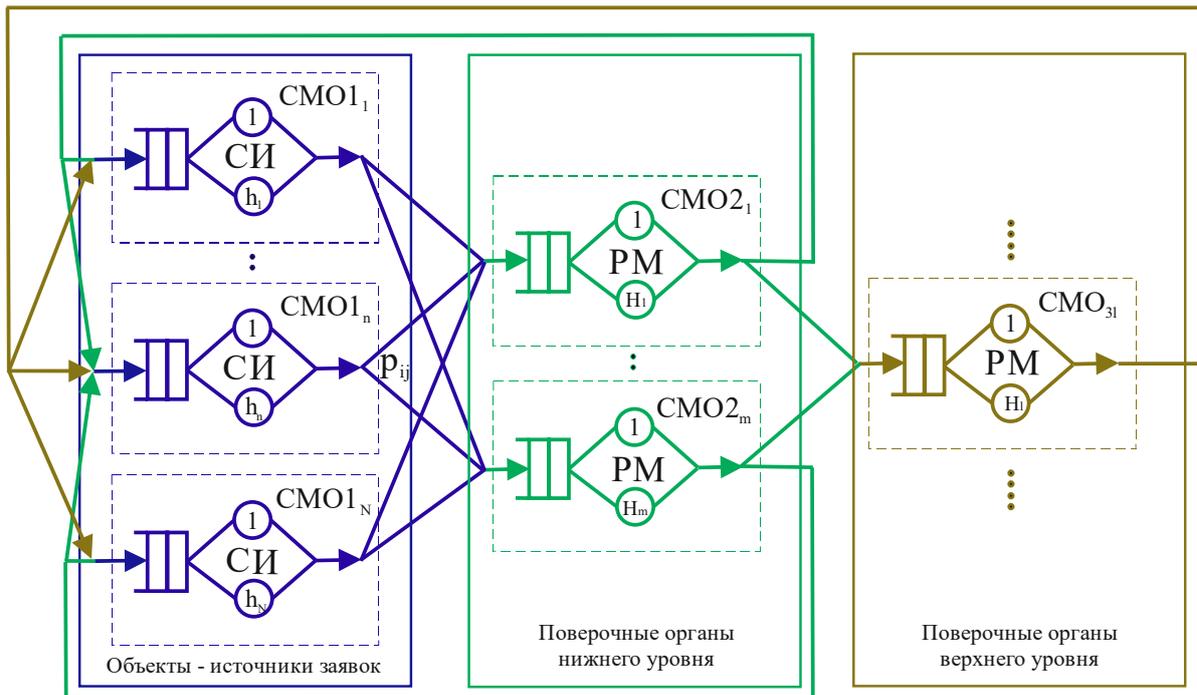


Рис. 1. Фрагмент сети массового обслуживания при децентрализованном двухуровневом обслуживании

Расчет показателей необходим для оценки качества организации поверки в распределенной системе поверочных органов и последующей оптимизации планирования поверочных работ. Поэтому показатели должны быть определены с учетом нагрузочно-временных характеристик потоков заявок на обслуживание и загрузки рабочих мест применительно к заданному распределению нагрузки. Таким образом, рассчитываемые технико-экономические показатели в обобщенном формализованном виде должны быть представлены как функции от заданных параметров системы

$$Y = f(X_N^{(1)}; X_M^{(2)}), \quad (1)$$

где $X_N^{(1)}$ – вектор параметров и характеристик совокупности N объектов обслуживания (число и типыверяемых СИ, нагрузочные характеристики потоков заявок на обслуживание, распределение нагрузки между поверочными органами и пр.); $X_M^{(2)}$ – вектор структурных и функциональных параметров распределенной системы из M поверочных органов (территориальное расположение, области аккредитации, количество и типы рабочих мест, порядок и интенсивности обслуживания и пр.); Y – обобщенное обозначение определяемого показателя качества.

В составе определяемых показателей рассмотрим стоимостные показатели, включающие единовременные и текущие составляющие, а также некоторые вероятностно-временные показатели применительно к группе объектов – источников заявок на обслуживание в поверочных органах. В силу того, что при организации поверочных работ используется годовое планирование, целесообразно рассматривать стоимостные показатели, определяемые или приведенные к одному году эксплуатации.

Состав и порядок расчета показателей качества

Требование экономичности подразумевает стремление к сокращению затрат как, собственно, на проведение поверочных работ, так и затрат, связанных с потерями от отсутствия СИ в местах эксплуатации и невозможности их применения для решения целевых задач. Поэтому экономичность организации поверки применительно к объектам – источникам заявок возможно охарактеризовать двумя группами затрат в соответствии с принятой методологией

представления затрат на обеспечение качества [2] – затратами на обеспечение соответствия СИ предъявляемым требованиям, и потерями (затратами) из-за несоответствия СИ требованиям.

Под соответствием СИ предъявляемым требованиям в данном случае понимается соответствие метрологическим требованиям за счет своевременного проведения обязательной поверки (калибровки) в аккредитованных органах, а также при необходимости и текущего ремонта. *Затраты на обеспечение соответствия* в этом случае складываются из затрат на доставку СИ в поверочные органы и обратно, собственно выполнение поверки (калибровки, ремонта) и приобретение и содержание резервного фонда СИ.

Транспортные расходы являются существенной составляющей затрат. В соответствии с рассматриваемой моделью СИ от каждого объекта направляются на поверку в одно из доступных на рассматриваемой территории поверочных подразделений. Поэтому транспортные расходы для всей совокупности объектов возможно определить при известных интенсивностях Λ_n ($n=1, \bar{N}$), исходящих из каждого объекта потоков заявок СИ на поверку с учетом маршрутной матрицы $P = p_{ij}$, $i, j = \overline{1, K}$, $K = N + M$, компоненты которой p_{ij} представляют собой вероятности направления СИ из i -го узла в j -й.

Если учесть, что СИ от каждого объекта направляются в поверочные органы, как правило, партиями, и известен средний размер партии каждого потока h_n , то за год величина транспортных расходов для n -го объекта на доставку СИ ко всем задействованным поверочным подразделениям и обратно определится выражением

$$C_{mp_n} = \sum_{j=1}^M \frac{\Lambda_n T_r}{h_n} p_{nj} C_{nj}, \quad (2)$$

где T_r – годовой бюджет времени; C_{nj} – стоимость транспортирования одной партии СИ от n -го объекта к j -му поверочному органу и обратно данным видом транспорта. Как правило, величина C_{nj} линейно зависит от расстояния, т.е. $C_{nj} = 2l_{nj}c$, где l_{nj} – расстояние от n -го объекта до j -го поверочного органа при доставке данным видом транспорта, c – удельные (на единицу расстояния) затраты на транспортирование при доставке данным видом транспорта.

Суммарные транспортные расходы C_{mp} для распределенной системы в целом могут быть определены суммированием затрат всех объектов системы на доставку к поверочным органам нижнего уровня и обратно, а также при двухуровневом обслуживании, на доставку от поверочных органов нижнего уровня к вышестоящим и обратно, т.е.

$$C_{mp} = \sum_{n=1}^N C_{mp_n} + \sum_{m=1}^M C_{mp_m}, \quad (3)$$

где C_{mp_m} – годовые транспортные расходы m -го поверочного подразделения на доставку партий СИ к вышестоящим подразделениям и обратно, определяемые на множестве поверочных органов M аналогично выражению (2) с учетом установленных маршрутной матрицей направлений.

Затраты на выполнение поверки (калибровки) СИ характеризуют собственно стоимость услуг поверочного органа по проведению работ. Поскольку поток заявок является неоднородным и на рабочих местах по поверке могут поверяться несколько типов СИ, затраты должны определяться пропорционально интенсивностям поступления, времени и стоимости поверки СИ каждого типа.

При определении данных составляющих будем для начала считать, что стоимость поверки СИ каждого типа не зависит от того, в каком поверочном органе она проводится, а зависит только от типа СИ. Такая ситуация может иметь место, например, при поверке в ведомственной системе поверочных органов, когда для всех подразделений устанавливаются единые тарифы. В этом случае суммарные годовые затраты C_n на оплату услуг поверочных органов зависят только от числа поступающих за год на поверку СИ каждого типа и стоимости поверки СИ каждого типа и могут быть определены как

$$C_n = \sum_{r=1}^R \Lambda_r T_r c_r, \quad (4)$$

где $\Lambda_r = \lambda_r h_r$ – суммарная интенсивность заявок на обслуживание r -го типа ($r = \overline{1, R}$); R – общее число типов СИ в рассматриваемой системе; h_r – количество СИ r -го типа; c_r – стоимость поверки одного СИ r -го типа, определяемая исходя из норм времени на поверку, стоимости нормо-часа работы поверителя и стоимости расходных материалов и ресурсов.

Возможны также ситуации, когда стоимость поверки СИ одного типа может быть различна в разных поверочных органах. Это может иметь место, например, когда СИ направляются на поверку не только в подразделения ведомственной метрологической службы, но и в органы Государственной метрологической службы и сторонние организации. В этом случае суммарные годовые затраты C_n на оплату услуг поверочных органов по проведению поверки определяются с учетом заданного маршрутной матрицей распределения потоков заявок между поверочными органами и могут быть определены выражением

$$C_n = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{r=1}^R \Lambda_{mj} T_{rj} c_{rj}, \quad (5)$$

где $\Lambda_{mj} = \lambda_{mj} h_{mj}$ – интенсивность потока заявок на обслуживание r -го типа от n -го объекта; h_{mj} – количество СИ r -го типа на n -м объекте; c_{rj} – стоимость поверки одного СИ r -го типа в j -м поверочном органе.

Затраты на выполнение ремонта имеют место в случаях, когда в метрологических подразделениях помимо поверки (калибровки) производится текущий ремонт СИ. Стоимость текущего ремонта, как правило, зависит от характера обнаруженного отказа. Можно предположить, что для каждого типа СИ возможны несколько видов отказов и, соответственно, несколько видов ремонта, определяемых в зависимости от объема и сложности выполняемых работ, расходуемых материалов и запасных частей. Суммарная стоимость C_p выполняемых за год ремонтных работ может быть определена через значения параметров потоков отказов каждого вида и соответствующие стоимости каждого вида ремонта по аналогии с определением стоимости поверочных работ.

Затраты на резервный фонд СИ представляют собой затраты организаций на приобретение и содержание резервного парка СИ, предназначенных для восполнения состава СИ в то время, когда часть СИ находится на обслуживании (поверке, калибровке, ремонте). Эти затраты включают в себя составляющие как капитальных затрат, так и текущих.

Величина капитальных затрат $K_{рез}$ на резервный фонд СИ характеризуется стоимостью приобретения СИ определенных типов в соответствии с потребностью на объектах и определяется выражением

$$K_{рез} = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R h_{pn} K_r, \quad (6)$$

где h_{pn} – количество резервных СИ r -го типа на n -м объекте; K_r – стоимость приобретения одного резервного СИ r -го типа.

Определение текущих затрат на обеспечение соответствия резервного парка СИ следует проводить, учитывая резервные СИ в составе общего потока заявок на обслуживание.

Под *потерями от несоответствия* будем считать те потери (или дополнительные затраты), которые обусловлены отсутствием СИ на штатном месте их эксплуатации. Затраты этой группы проявляются опосредованно через установленный порядок применения СИ в основном процессе функционирования объекта (производственном, эксплуатационном и т.п.) и в зависимости от задачи, в которой используется измерительная информация.

Отметим, что отсутствие СИ на штатном месте эксплуатации не всегда влечет за собой возникновение потерь. При создании на объектах резервного фонда СИ объем резерва определяется исходя из предположения о некотором ожидаемом времени отсутствия некоторого

числа СИ на месте эксплуатации. Если фактическое время отсутствия не превышает заданного, то при правильном планировании число одновременно находящихся на обслуживании СИ не превышает имеющегося резерва, и оставшиеся на местах эксплуатации СИ с учетом резерва успешно обеспечивают выполнение текущих задач. Если же фактические времена нахождения СИ на обслуживании начинают превышать заданные, то остающихся СИ уже становится недостаточно для функционирования объекта, что приводит к возникновению потерь. Величина таких потерь за рассматриваемый интервал будет пропорциональна доле времени, в течение которой на объекте общее число СИ, находящихся на штатных местах, менее необходимого.

Применительно к установившемуся режиму эта доля времени характеризуется стационарной вероятностью нахождения системы в произвольный момент времени в состоянии, когда число СИ на штатных местах менее необходимого. Такая система может быть представлена как система с резервированием из $h = h_n + h_p$ элементов (СИ), из которых h_n – число необходимых (основных) элементов, а h_p – число резервных элементов.

В случае, если распределенная система поверочных органов описана моделью сети массового обслуживания [1], стационарные вероятности нахождения системы в произвольно заданных состояниях h_{nr} могут быть определены известными [3, 4] соотношениями. Поэтому стационарная вероятность того, что на n -м объекте число СИ r -го типа окажется менее необходимого, определяется через сумму вероятностей нахождения сети массового обслуживания во всех состояниях, удовлетворяющих условию $h_{nr} < h_n$, т.е.

$$P_{h_{nr} < h_n} = \sum_{h_{nr}=0}^{h_n-1} P(h_{nr}), \quad (7)$$

где $P(h_{nr})$ – вероятность нахождения системы в состоянии, когда на n -м объекте находится h СИ r -го типа.

Для случая, когда СИ однотипны, а условия их работы независимы и известны распределения вероятностей их состояний, вероятность $P_{h_{nr} < h_n}$ может быть определена через известное биномиальное распределение [5]:

$$P_{h_{nr} < h_n} = 1 - \sum_{k=0}^{h_n-1} \frac{h!}{k!(h-k)!} p^k (1-p)^{h-k}, \quad (8)$$

где h – общее число СИ данного типа на рассматриваемом объекте; h_n – число необходимых (основных) СИ; h_p – число резервных СИ; p – вероятность нахождения СИ данного типа на штатном месте эксплуатации.

Стационарная вероятность $P_{h_{nr} < h_n}$ может использоваться для оценки качества организации поверочных работ в распределенной системе в целом, поскольку характеризует долю времени, в течение которой возможен ущерб от отсутствия СИ на местах эксплуатации. При этом данный показатель позволяет отразить влияние на процесс применения СИ наиболее существенных факторов организации проверки. При известной доле времени, в течение которой общее число СИ, находящихся на штатных местах, менее необходимого, можно оценить величину потерь.

Задача оценки потерь от отсутствия СИ является неоднозначной, поскольку в существенной степени определяется спецификой организации основного процесса функционирования объекта, особенностями применения СИ в этом процессе и их влиянием на результативность этого процесса. Для дальнейшей оценки потерь будем считать, что применению каждого СИ соответствует некоторый полезный эффект, величина которого выражается в стоимостном представлении и является линейной функцией времени. Величина удельного полезного эффекта (в единицу времени) может быть в общем случае различной как в зависимости от типа СИ, так и в зависимости от условий их применения. Рассмотрим подходы к расчету потерь от отсутствия СИ для некоторых наиболее характерных вариантов применения группы СИ и их влияния на основной процесс функционирования объекта.

Первый вариант характеризуется ситуацией, когда все СИ на объекте применяются автономно, т.е. независимо друг от друга. Отсутствие в составе такой системы любого из СИ не влияет на работу других СИ, а влечет только невыполнение отдельной измерительной задачи. Будем полагать, что в этом случае не происходит полной остановки основного процесса функционирования объекта, однако сокращается величина производимого полезного эффекта (например, происходит снижение производительности, или сокращение функциональности и пр.). Причем размер такого сокращения в общем случае различен для разных типов отсутствующих СИ. В этом случае величина потерь, или недополученного полезного эффекта, из-за отсутствия СИ за интервал времени T_r может быть определена выражением

$$C_{\text{отс}} = \sum_{r=1}^R K_{n_r} T_r c_{n_r}, \quad (9)$$

где K_{n_r} – коэффициент простоя СИ r -го типа; c_{n_r} – удельные потери от отсутствия СИ r -го типа.

Другой вариант характерен для ситуации, когда все СИ на объекте применяются в составе единой измерительной системы, причем отсутствие в ее составе хотя бы одного СИ приводит к неработоспособности системы в целом. В этом случае для однотипных СИ стационарная вероятность $P_{h_{nr} < h_n}$ приобретает смысл коэффициента простоя K_{n_r} системы из группы однотипных СИ, в которой условие работоспособности системы задано как одновременное наличие на объекте в произвольный момент времени работоспособных (поверенных) СИ в количестве не менее заданного.

Если в составе измерительной системы на n -м объекте при этом применяются группы СИ нескольких типов ($r = \overline{1, R}$), то коэффициент готовности такой системы определяется выражением

$$K_{\Gamma_n} = \prod_{r=1}^R K_{\Gamma_{nr}} = \prod_{r=1}^R P_{h_{nr} \geq h_n} = \prod_{r=1}^R (1 - P_{h_{nr} < h_n}). \quad (10)$$

Соответственно, коэффициент простоя измерительной системы, на n -м объекте которой применяются группы СИ нескольких типов ($r = \overline{1, R}$), вычисляется по формуле

$$K_{n_n} = 1 - K_{\Gamma_n} = 1 - \prod_{r=1}^R (1 - P_{h_{nr} < h_n}). \quad (11)$$

В случае неработоспособности измерительной системы по причине отсутствия поверенных СИ на штатных местах возможны две основные ситуации: либо остановка основного процесса функционирования объекта, либо его продолжение без применения СИ, т.е. без контроля качества.

Для случая остановки основного технологического процесса из-за отсутствия СИ величина потерь за интервал времени T_r характеризуется недополученным полезным эффектом и может быть определена выражением

$$C_{\text{отс}} = K_n T_r c_n, \quad (12)$$

где c_n – удельные потери (в единицу времени), равные удельному полезному эффекту от основного процесса.

Для ситуации продолжения основного процесса без использования СИ возможные потери в общем случае могут быть определены через внутренние и внешние затраты от невыявленных дефектов (ошибок, брака) вследствие отсутствия контроля качества [2]. Внутренние затраты при этом связаны с устранением дефектов в случае их выявления на самом объекте, а внешние потери связаны с пропуском дефектной продукции к потребителю.

На самом объекте дефект, произошедший за время отсутствия СИ, зачастую может быть выявлен иными средствами (например, в ходе последующей технологической или контрольной операции). Возможность выявления дефекта на объекте характеризуется некоторой веро-

ятностью, а за некоторое время T_1 отсутствия СИ может быть обнаружено среднее количество дефектов $D_1(T_1)$. В случае пропуска к потребителю дефектной продукции потребителем за время эксплуатации T_2 может быть выявлено среднее число дефектов $D_2(T_2)$. Тогда средняя величина внутренних и внешних затрат, обусловленных отсутствием СИ, может быть определена как

$$C_{\text{отс}} = D_1(T_1)C_{\text{внутр}} + D_2(T_2)C_{\text{внешн}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{внутр}}$ – внутренние потери при выявлении одного дефекта на объекте; $C_{\text{внешн}}$ – внешние потери в случае обнаружения дефекта у потребителя (т.е. потери от предъявляемых рекламаций, штрафов, выездов специалистов и прочего в период гарантийного обслуживания).

Для оценки годовых затрат время T_1 следует определять как суммарное время отсутствия СИ за год, а в качестве времени эксплуатации T_2 также рассматривать один год (как правило, совпадающий с гарантийным сроком).

При других вариантах организации функционирования объекта и использования СИ и при других видах контроля рассмотренные соотношения для оценки затрат подлежат корректировке с учетом соответствующих условий.

Суммарные годовые текущие затраты $C_{\text{тек}}$ для группы объектов, обслуживаемых в распределенной системе поверочных органов, включают составляющие затрат на обеспечение соответствия СИ и потерь из-за несоответствия требованиям и определяются суммированием составляющих

$$C_{\text{тек}} = C_{\text{тр}} + C_{\text{п}} + C_{\text{р}} + C_{\text{отс}}. \quad (14)$$

Суммарные затраты объектов – владельцев СИ на организацию поверки можно оценить через величину $Z_{\text{пр}}$ приведенных затрат, определяемых с учетом текущих и капитальных составляющих известным выражением

$$Z_{\text{пр}} = C_{\text{тек}} + E_{\text{н}}K, \quad (15)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Заключение

С использованием рассмотренного подхода может быть определен ряд важных технико-экономических показателей качества организации поверочных работ в децентрализованной распределенной системе поверочных органов. Расчет показателей производится с учетом состава и характеристик подлежащих поверке СИ и структурно-функциональных параметров системы поверочных органов. Это позволит использовать полученные результаты при сравнительном анализе вариантов, а также при решении оптимизационных задач по организации и планированию поверочных работ в распределенной системе поверочных органов.

Список литературы

1. Ефремов А. С., Швед А. С., Лукичев Л. В. Структурно-функциональная модель распределенной системы поверочных органов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 22–30.
2. Аристов О. В. Управление качеством. М. : ИНФРА-М, 2020. 224 с.
3. Жожикашвили В. А., Вишневицкий В. М. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ. М. : Радио и связь, 1988. 192 с.
4. Зеленцов В. А., Гагин А. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи. Ленинград : МО СССР, 1991. 170 с.
5. Дорохов А. Н., Керножицкий В. А., Миронов А. Н., Шестопалова О. Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. СПб. : Лань, 2016. 352 с.

References

1. Efremov A.S., Shved A.S., Lukichev L.V. Structural and functional model of a distributed system of verification organs. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;2:22–30. (In Russ.)
2. Aristov O.V. *Upravlenie kachestvom = Quality management*. Moscow: INFRA-M, 2020:224. (In Russ.)
3. Zhzhikashvili V.A., Vishnevskiy V.M. *Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primeneniye k setyam EVM = Queuing networks. Theory and application to computer networks*. Moscow: Radio i svyaz', 1988:192. (In Russ.)
4. Zelentsov V.A., Gagin A.A. *Nadezhnost', zhivuchest' i tekhnicheskoye obsluzhivaniye setey svyazi = Reliability, survivability and maintenance of communication networks*. Leningrad: MO SSSR, 1991:170. (In Russ.)
5. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespecheniye nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem = Ensuring the reliability of complex technical systems*. Saint-Petersburg: Lan', 2016:352. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Андрей Станиславович Ефремов**

кандидат технических наук, доцент,
преподаватель кафедры метрологического
обеспечения вооружения, военной
и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Andrey S. Efremov

Candidate of technical sciences, associate professor,
lecturer of sub-department of metrological support
of arms, military and special equipment,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Андрей Викторович Иванов

кандидат военных наук, доцент,
профессор кафедры технологий и средств
геофизического обеспечения войск,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Andrey V. Ivanov

Candidate of military sciences, associate professor,
professor of sub-department of technologies
and means of geophysical support of troops,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Леонид Викторович Лукичев

адъюнкт,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Leonid V. Lukichev

Adjunct,
Military Space Academy
named after A. F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.3.032

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ КРУГЛОЙ МЕМБРАНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Е. А. Рыблова¹, В. С. Волков²

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

¹Elizaveta.ryblova@mail.ru, ²vadimv_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. *Материалы и методы.* Проведено имитационное моделирование чувствительного элемента в виде профилированной кремниевой мембраны методом конечных элементов для определения геометрических параметров сечения мембраны, обеспечивающих максимальную чувствительность. *Результаты.* Определены оптимальные геометрические характеристики сечения профилированной мембраны полупроводникового тензопреобразователя давления для достижения максимальной чувствительности преобразования. Создана имитационная модель полупроводникового чувствительного элемента датчика давления с повышенной чувствительностью для исследования влияния геометрических параметров сечения мембраны на характеристики преобразователя методом конечных элементов. *Выводы.* Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал, что профилированная мембрана обладает наилучшей чувствительностью в сравнении с плоской мембраной такого же радиуса.

Ключевые слова: полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, чувствительный элемент, кремниевая мембрана, радиальное и тангенциальное механическое напряжение, имитационное моделирование

Для цитирования: Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 39–46. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE SEMICONDUCTOR SENSOR ELEMENT IN THE FORM OF A CIRCULAR MEMBRANE IN ORDER TO INCREASE THE SENSITIVITY

E.A. Ryblova¹, V.S. Volkov²

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

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

Abstract. *Background.* The aim of the study is to develop a semiconductor sensing element for a pressure sensor based on the piezoresistive effect in the form of a profiled membrane with increased sensitivity. *Materials and methods.* Modeling of a sensitive element in the form of a profiled silicon membrane by the finite element method was carried out to determine the geometric parameters of the membrane cross-section that provide maximum sensitivity. *Results.* The optimal geometric characteristics of the cross-section of the profiled membrane of a semiconductor pressure sensor are determined to achieve maximum conversion sensitivity. A simulation model of a semiconductor sensitive element of a pressure sensor with increased sensitivity was created to study the influence of geometric parameters of the membrane cross-section on the characteristics of the transducer by the finite element method. *Conclusions.* The analysis of the re-

sults obtained in the course of the study showed that the profiled membrane has the best sensitivity in comparison with a flat membrane of the same radius.

Keywords: semiconductor piezoresistive pressure sensor, sensing element, silicone membrane, radial and tangential mechanical stresses, simulation modeling

For citation: Rybolova E.A., Volkov V.S. Optimization of the parameters of the semiconductor sensor element in the form of a circular membrane in order to increase the sensitivity. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 39–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5

В настоящее время одним из наиболее распространенных типов чувствительных элементов тензорезистивных датчиков давления являются полупроводниковые (кремниевые) мембраны.

Одними из основных требований к современным полупроводниковым тензодатчикам давления являются требования по снижению массы и габаритных размеров измерительных приборов при одновременном повышении чувствительности. Наиболее часто в конструкциях тензопреобразователей используются плоские мембраны и мембраны с жестким центром. При уменьшении толщины мембраны обеспечивается более высокая чувствительность, однако уменьшить толщину можно только до определенных пределов, ограничиваемых технологией изготовления и воспроизводимостью геометрических характеристик мембраны. Кроме того, при уменьшении толщины мембраны существенно увеличивается зависимость механического напряжения от приложенного давления, а следовательно, и нелинейность функции преобразования. Некоторое увеличение выходного сигнала и линейности функции преобразования обеспечивают мембраны с жестким центром, однако их существенным недостатком является чувствительность к ударам и вибрациям, при которых жесткий центр ведет себя подобно инерционной массе, что является причиной значительной дополнительной погрешности выходного сигнала.

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, 2]

Для определения оптимальной формы мембраны, удовлетворяющей таким требованиям, как высокая чувствительность и линейность выходного сигнала, было проведено моделирование полупроводниковых мембран переменной толщины с профилем, сочетающим широкие и узкие участки. Для снижения требований к вычислительной мощности персонального компьютера были построены двухмерные модели профилей мембран. Методом конечных элементов было смоделировано напряженно-деформированное состояние мембраны под воздействием приложенного давления.

Для исследования были выбраны семь ЧЭ, сечения которых представляют собой сочетания широких и узких участков с соотношением ширины 3:1 (данное соотношение было взято за основу у одного из аналогов, ЧЭ переменной толщины US Pat. No. 4236137), при этом изменялся радиус мембран и ширина узкого и широкого участков. Однако в документе US Pat. No. 4236137 не приведено точных габаритных размеров мембраны и длины и ширины каждого из участков. Поэтому предложенные геометрические размеры мембран выбирались исходя из приведенного схематического рисунка с условием, чтобы радиус ЧЭ не превышал 1,5 мм. После чего соотношения длины и ширины участков менялись для определения наиболее оптимальной конструкции. Приложенное давление составляет 0,2 МПа. Значение приложенного давления 0,2 МПа выбрано из условия, чтобы эквивалентное напряжение по Мизесу не превышало 350 МПа и не вызывало разрушения мембраны. На рис. 1–7 приведены эскизы чувствительных элементов.

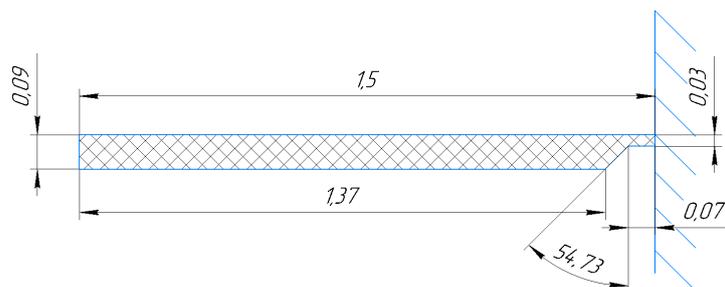


Рис. 1. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 1,5:1,37

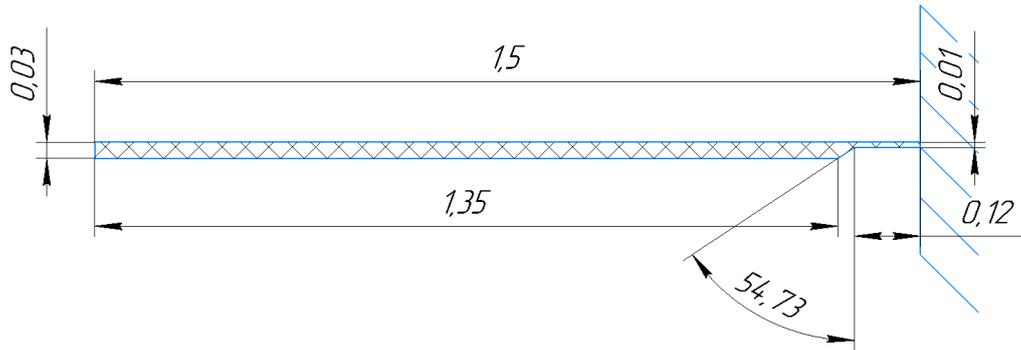


Рис. 2. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 1,5:1,35

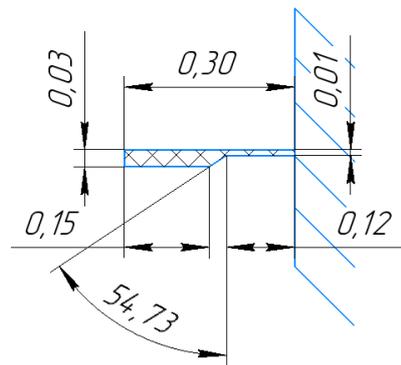


Рис. 3. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 0,30:0,15

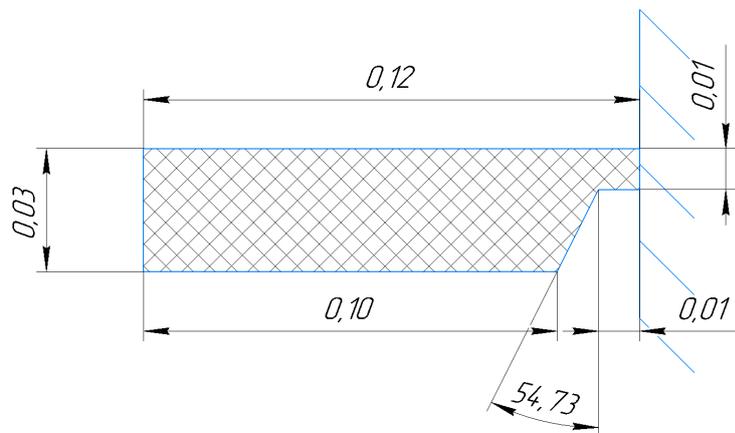


Рис. 4. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 0,12:1,10

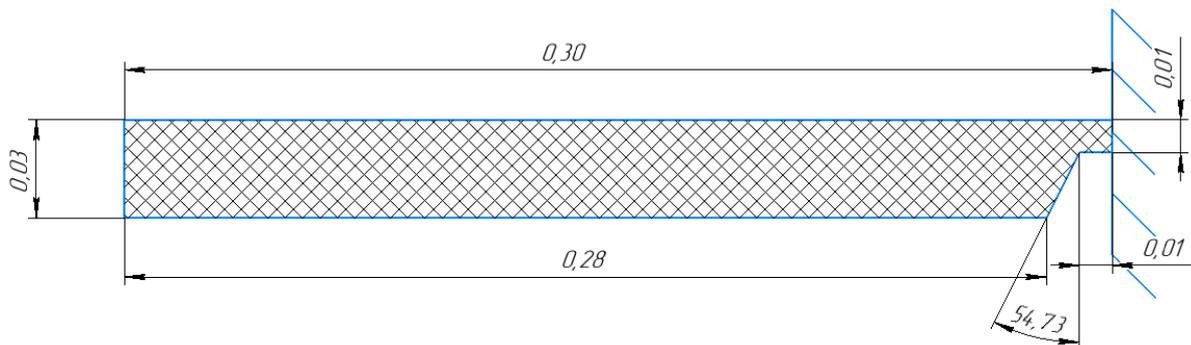


Рис. 5. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 0,30:1,28

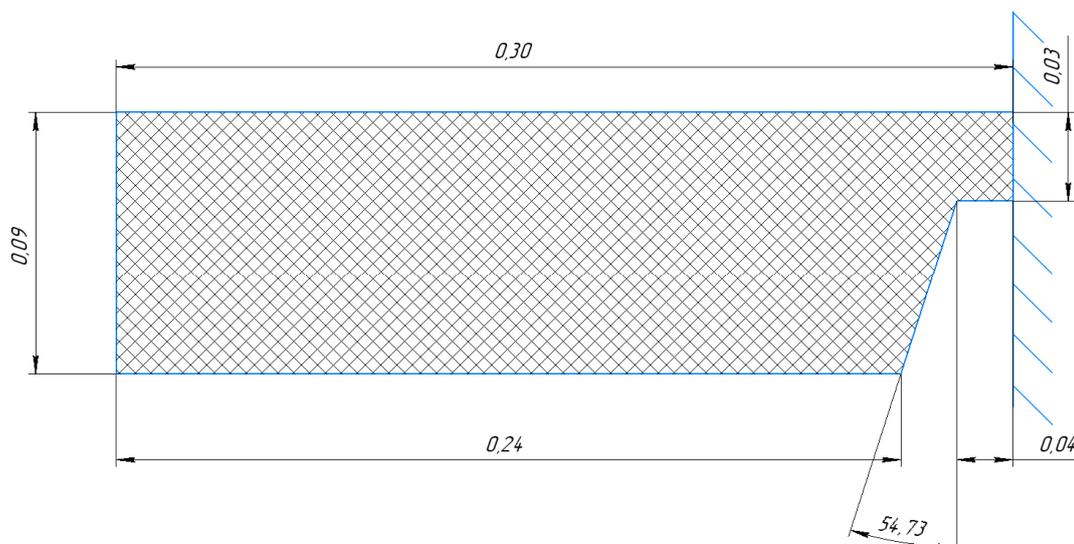


Рис. 6. Эскиз чувствительного элемента с соотношением размеров 0,30:1,24

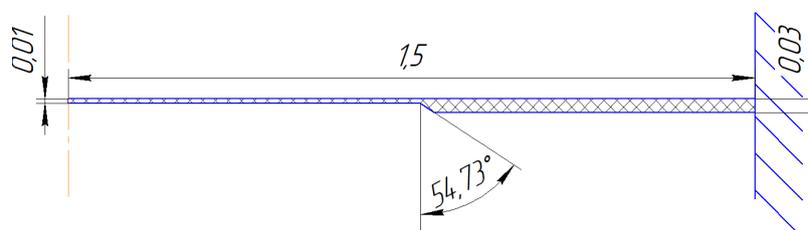


Рис. 7. Эскиз предложенной конструкции

Следует отметить, что первые шесть образцов ЧЭ – мембраны с жестким центром, седьмая мембрана, наоборот, имеет узкую часть в центре и широкую у краев, в области жесткой заделки.

По результатам численного моделирования были определены напряжения по Мизесу, характеризующие прочность мембраны при воздействии давления для каждого из образцов; данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжения по Мизесу, характеризующие прочность мембраны

Мембрана (номер соответствует номеру рисунка)	Напряжение по Мизесу
1 мембрана	150 МПа
2 мембрана	1 ГПа
3 мембрана	300 МПа
4 мембрана	65 МПа
5 мембрана	330 МПа
6 мембрана	40 МПа
7 мембрана	330 МПа

Из полученных данных видно, что напряжение по Мизесу у второй мембраны явно превышает 350 МПа (данное значение рекомендуется в качестве допускаемого напряжения), поэтому в дальнейшем она не рассматривается [3].

Следующим этапом в выборе оптимальных параметров мембраны является определение чувствительности. Выходной сигнал ЧЭ с мостовой схемой пропорционален разности радиального и тангенциального напряжений, поэтому рассматривается зависимость разности напряжений от приложенного давления.

Чувствительность преобразования давления в механическое напряжение в данном случае будет определяться по графику зависимости разности напряжений от приложенного дав-

ления на расстоянии, равном половине длины тензорезистора, от жесткой заделки мембраны. Из технологических ограничений минимальное значение длины принято равным 100 мкм. Это позволяет учесть конечную длину тензорезистора (т.е. рассматривается разность радиального и тангенциального напряжений в центре полоскового тензорезистора). На рис. 8 представлен график зависимости разности напряжений от приложенного давления для мембраны 1 и предложенной конструкции (мембраны 7).

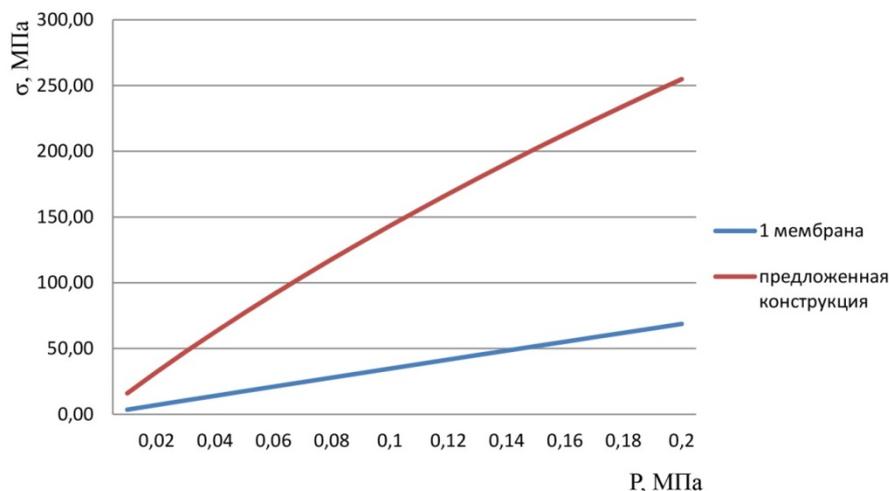


Рис. 8. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления для 1 мембраны (синий) и предложенной конструкции (красный)

Такие графики были построены для всех шести мембран. Напряжение в месте расположения тензорезисторов в данном случае будет определяться по графику зависимости разности напряжений от координаты на расстоянии равном 0,5 минимальной длины тензорезистора. Значение напряжения в месте расположения тензорезисторов можно рассчитать по формуле как среднее значение:

$$\sigma = \frac{\Delta\sigma_{1,5} + \Delta\sigma_{1,4}}{2}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – значение разности напряжений в определенной координате.

Чувствительность S рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\sigma_r - \sigma_t}{P}, \quad (2)$$

где σ_r – радиальное механическое напряжение; σ_t – тангенциальное механическое напряжение; P – приложенное давление.

В табл. 2 сведены полученные данные по расчету чувствительности для каждой из рассматриваемых мембран, кроме мембраны 2, так как она была исключена ранее.

Таблица 2

Данные по расчету чувствительности для рассматриваемых мембран

Мембрана (номер соответствует номеру рисунка)	Значение чувствительности S
1 мембрана	325
3 мембрана	750
4 мембрана	185
5 мембрана	1000
6 мембрана	85
7 мембрана	1250

Таким образом, наибольшее значение чувствительности соответствует 7 мембране, эскиз мембраны представлен на рис. 9.

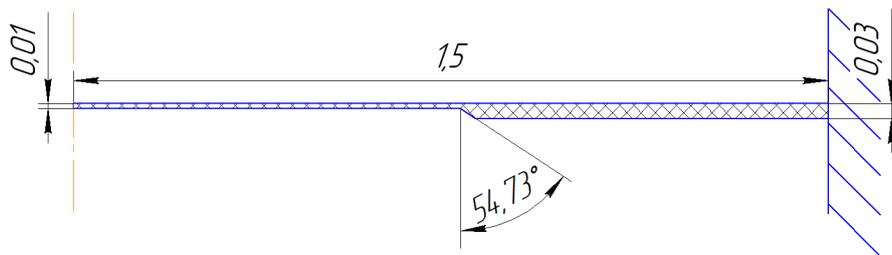


Рис. 9. Предложенная конструкция мембраны с максимальной чувствительностью

После определения оптимальных геометрических параметров мембраны по критерию чувствительности был проведен расчет погрешности линейности каждой из мембран, а также выигрыш в механическом напряжении предложенной конструкции в сравнении с каждой мембраной.

Таблица 3

Результаты расчета погрешностей и механических напряжений мембран

Мембрана	Выигрыш в напряжении предложенной конструкции (мембрана 7) по сравнению с другими мембранами, %	Максимальная погрешность мембраны	Максимальная погрешность предложенной конструкции (мембрана 7)
1	281,55	0,34	3,93
3	69,34	2,21	3,93
4	11517,82	0,02	3,93
5	719,85	0,21	3,93
6	2237,00	0,01	3,93

Из табл. 3 видно, что предложенная конструкция (мембрана 7) имеет преимущество – повышенную чувствительность, однако имеет сравнительно большую погрешность линейности выходного сигнала почти 4 %.

Далее определяется соотношение размеров широкого и узкого участков мембраны.

Для этого были исследованы зависимости и построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от координаты «ступеньки», под которой понимается переход от узкого участка к широкому. Для начала определяем, при какой координате «ступеньки» у предложенной конструкции наилучшая чувствительность с соотношением толщины широкого и узкого участков [3:1]. Для этого изменялась координата «ступеньки» от 0,6 до 1,2 мм от центра мембраны с шагом 0,05 мм. Для каждого случая был построен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления [4].

На основе полученных графиков была построена зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от относительной координаты ступеньки (рис. 10).

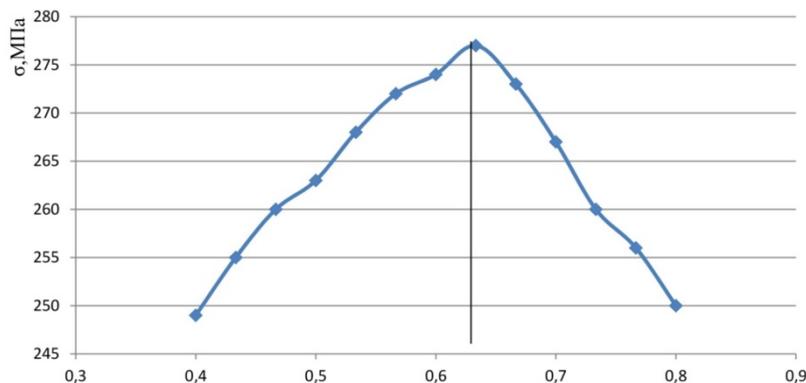


Рис. 10. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от относительной координаты ступеньки

Из полученных данных видно, что наилучшая чувствительность соответствует мембране с координатой ступеньки 0,95 мм (0,63 относительных единиц) от центра. График зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления при координате ступеньки 0,95 представлен на рис. 11.

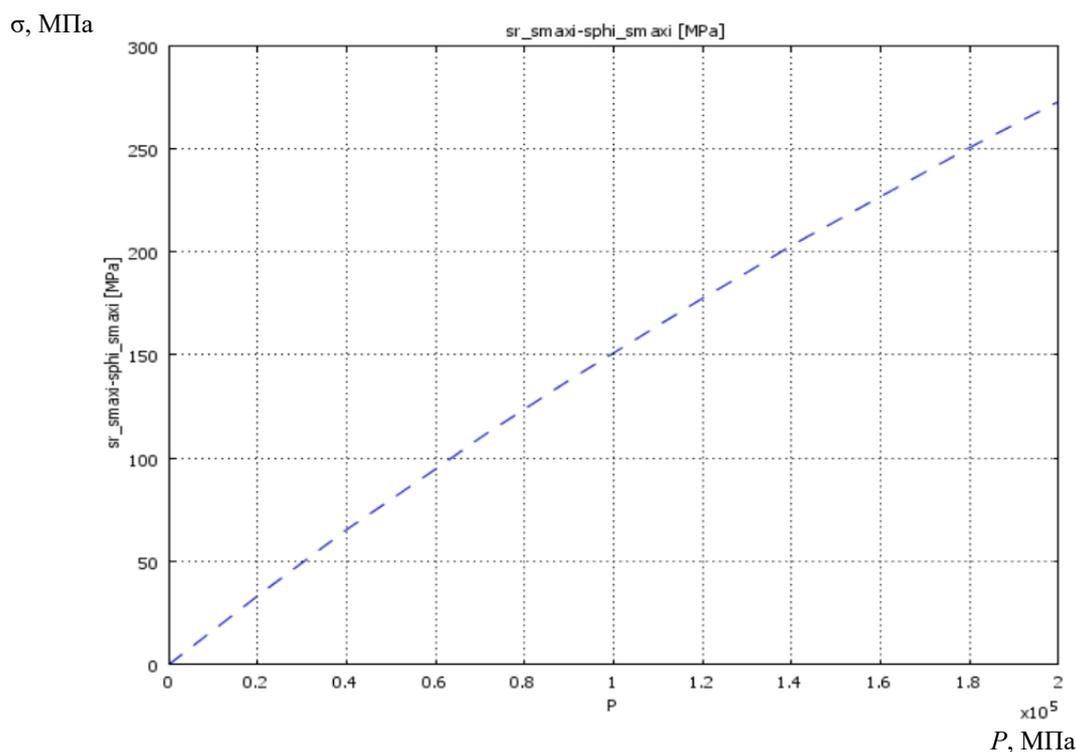


Рис. 11. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления при координате ступеньки 0,95 мм от центра мембраны

Из графиков видно, что наилучшая чувствительность соответствует координате ступеньки 0,95 мм от центра. Таким образом, определив координату ступеньки, мы увеличиваем чувствительность полупроводникового тензопреобразователя.

Было проведено сравнение предложенной конструкции с плоской мембраной такого же радиуса 1,5 мм и толщиной 30 мкм, равной толщине широкого участка профилированной мембраны.

Для каждой из мембран была рассчитана чувствительность преобразования давления в механическое напряжение по формуле (2), далее приведены полученные в результате расчета данные.

Для плоской мембраны

$$S = \frac{225,99}{0,3} = 1129,95.$$

Для профилированной мембраны

$$S = \frac{301,17}{0,2} = 1505,85.$$

Также для каждой из мембран была рассчитана погрешность линейности выходного сигнала, для плоской мембраны она составила 2,88 %, а для предложенной конструкции – 3,33 %.

Для наглядного сравнения плоской мембраны и предложенной конструкции полученные данные сведены в табл. 4

Таблица 4

Данные сравнения плоской мембраны и предложенной конструкции

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Предложенная конструкция	3,33 %	1505,85
Плоская мембрана	2,88 %	1129,95

Из полученных данных видно, что предложенная конструкция существенно увеличивает чувствительность ЧЭ полупроводникового тензодатчика в сравнении с датчиком, в основе которого лежит плоская мембрана такого же диаметра (более чем на 30 %), однако погрешность линейности выходного сигнала составляет 3,33 %, что на 0,45 % выше, чем у плоской мембраны. Таким образом, предложенная конструкция позволяет повысить чувствительность полупроводникового тензопреобразователя, при этом погрешность линейности остается достаточно высокой. Дальнейшее исследование предложенной конструкции будет направлено на снижение погрешности линейности.

Список литературы

1. US Pat. № 4236137. Semiconductor transducers employing flexure frames / Kurtz [et al.]. 25 nov. 1980.
2. Shyam Aravamudhan. Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography. University of South Florida Scholar Commons. Date of Approval: October 25, 2006.
3. Gad-el-Hak M. The MEMS handbook. CRC press, 2001.
4. Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров чувствительного элемента преобразователя давления в виде круглой мембраны // Волоконно-оптическое приборостроение : материалы Междунар. науч.-техн. конф. с элементами науч. молодежной школы, посвящ. 20-летию ведущей научной школы России / под ред. Т. И. Мурашкиной. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. С. 102–104.

References

1. US Pat. № 4236137. *Semiconductor transducers employing flexure frames*. November 25, 1980.
2. Shyam Aravamudhan. *Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography*. University of South Florida Scholar Commons. Date of Approval: October 25, 2006.
3. Gad-el-Hak M. *The MEMS handbook*. CRC press, 2001.
4. Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of the parameters of the sensor element of the pressure converter in the form of a round membrane. *Volokonno-opticheskoe priborostroenie: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauch. molodezhnoy shkoly, posvyashch. 20-letiyu vedushchey nauchnoy shkoly Rossii = Fiber-optic instrumentation: materials of the International Scientific and Technical conf. with elements of science. youth school, dedicated to. The 20th anniversary of the leading scientific school of Russia*. Penza: Izd-vo PGU, 2018:102–104. (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 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 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

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

УДК 621.389, 681.586.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КИСТЬЮ РУКИ

Е. В. Буныгин¹, В. М. Чайковский²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Механические операции в различной среде, агрессивной для кожи человека, успешно могут быть выполнены роботизированной кистью руки, управляемой специальным блоком. Последний содержит перчатку с тензорезистивными датчиками, управляющими работой роботизированной кистью руки человека, с помощью сервоприводов, обрабатывающих сигналы датчиков и повторяющих все движения перчатки с данными датчиками на кисти руки человека. Причем конструкция перчатки не вызывает дискомфорта, не сковывает движения кисти руки человека и не нарушает ее естественного движения. *Материалы и методы.* Разработка блока управления роботизированной кистью руки проведена с использованием 3D-печати с последующим схемотехническим макетированием всей сопутствующей электронной части. *Результаты.* Изготовлен действующий вариант предплечья руки с роботизированной кистью, управляемой по Bluetooth-каналу сигналами от тензорезистивных датчиков перчатки, одетой на кисть руки человека. *Выводы.* Сравнительный анализ данного устройства с существующими аналогами: робот-манипулятор компании «Birdi» [1], линейный робот-манипулятор отечественной компании «АРКОДИМ-Про» [2] и другие – показывают его достоинства, достигаемые как за счет использования современных методов реализации, с экологичностью производства его компонентов, так и в возможности достаточно широкой перспективы в разработке на его основе подобных устройств, решающих аналогичные задачи.

Ключевые слова: тензорезистивный датчик, роботизированное устройство, радиоуправление

Для цитирования: Буныгин Е. В., Чайковский В. М. Блок управления роботизированной кистью руки // Изобретения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 47–52. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

ROBOTICK HAND CONTROL UNIT

E.V. Bunygin¹, V.M. Chaykovskiy²

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

^{1,2} rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Mechanical operations in an environment aggressive to human skin can be successfully performed by a robotic arm controlled by a special unit. The latter contains a glove with tensorresistive sensors that control a robotic human hand, using servo drives, processing sensor signals and repeating the movements of the glove with these sensors on the human hand. Moreover, the design of the glove does not cause discomfort, does not constrain the movement of the human hand and does not disrupt its natural movement. *Materials and methods.* The development of the control unit for the robotic hand was carried out using 3D printing, followed by an electronic layout of the entire accompanying electronic part. *Results.* A working version of the forearm of the hand with a robotic hand, controlled via a Bluetooth-channel by signals from strain-resistive sensors of a glove, worn on a human hand, has been made. *Conclusions.* A comparative analysis of this device with existing analogues: robotic manipulator of «Birdi» company [1], linear robotic manipulator of domestic company ARKODIM-Pro [2], etc. Shows its advantages, achieved both through the use of modern methods of implementation, environmental friendliness of production of its components, as well as the possibility of a fairly broad perspective in the development of similar devices on its basis that solve similar problems.

Keywords: tensoresistive sensor, robotic device, radio control

For citation: Bunygin E.V., Tchaikovsky V.M. Robotic hand control unit. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 47–52. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-6

Целью работы является разработка блока управления роботизированным устройством (механической кистью руки в виде перчатки), созданной с помощью 3D-печати, с использованием тензорезистивных датчиков [3], расположенных на объекте управления. Предлагаемая система позволяет удаленно обеспечивать управление устройством посредством радиосвязи через Bluetooth-модуль. Работа системы осуществляется следующим образом:

1) при сгибании пальцев перчатки поступает сигнал с закрепленных на них тензорезистивных датчиков;

2) проходя по цепи передающего блока, сигнал усиливается, оцифровывается, подвергается программной обработке в узле микроконтроллера и передается в радиоканал через оконечное устройство – Bluetooth-модуль;

3) полученный сигнал на аналогичном Bluetooth-модуле приемной части так же обрабатывается и поступает на сервоприводы, находящиеся в конструкции предплечья руки, обеспечивающие подвижность роботизированной кисти.

Основные задачи, стоящие перед робототехникой, – это разработка теоретических методов и технологических приемов для реализации функций человека в виде конкретных устройств, обеспечивающих эффективное выполнение определенного технологического процесса. Использование аддитивных технологий для создания элементов конструкций позволяет значительно сокращать время и затраты на производство, материалы и рабочую силу.

Структурная схема предлагаемого блока управления представлена на рис. 1. Она содержит две части, передающую и приемную, в состав которых входят: пять тензорезистивных датчиков (ТД1-5), пять усилителей напряжения (УН1-5), мультиплексор, аналого-цифровой преобразователь, два микроконтроллера, два Bluetooth-модуля, ШИМ-контроллер, понижающий преобразователь напряжения, два стабилизатора напряжения, аккумулятор и схему его заряда. Также в состав приемной части входят пять серводвигателей, выполняющих функцию оконечного исполнительного устройства.

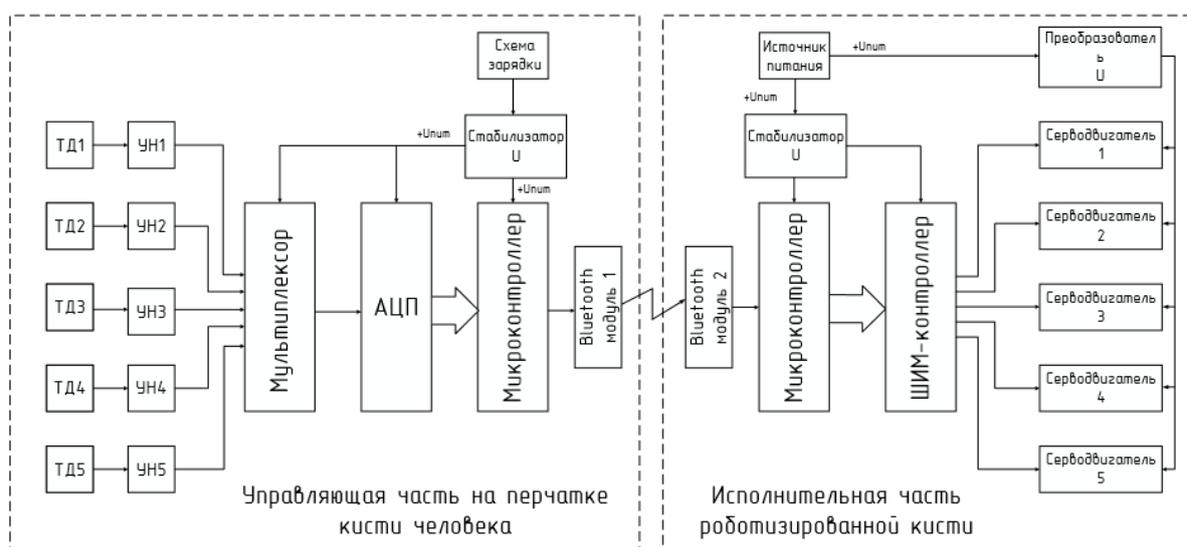


Рис. 1. Структурная схема блока управления роботизированной кистью

Работа предлагаемого блока осуществляется следующим образом. Тензорезистивные датчики [4], входящие в состав перчатки на кисти руки оператора, за счет воздействия на них механического воздействия (изгиба пальцев кисти руки оператора), формируют электрические сигналы в виде изменения значения амплитуды своего выходного напряжения. Далее эти сигналы через усилители напряжения поступают на входы аналогового мультиплексора, после чего коммутированные поступают с выхода мультиплексора на вход АЦП. Далее они уже

в виде дискретных сигналов поступают на микроконтроллер, где проходят обработку программным комплексом. Программное обеспечение микроконтроллера компилирует полученную информацию с датчиков и после ее преобразования отправляет ее уже в виде сигнала на Bluetooth-модуль для последующей передачи по радиоканалу.

В микроконтроллере приемной части полученный сигнал проходит программную обработку, после чего он через ШИМ-контроллер поступает на серводвигатели, отвечающие за подвижность роботизированной кисти.

Понижающий преобразователь напряжения вырабатывает основное напряжение питания для нормальной работы серводвигателей. Питание передающего блока осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В, приемного блока – от батареи напряжением 12 В. Зарядка аккумулятора осуществляется от внешнего источника питания через встроенную схему заряда.

Для обеспечения стабильной работы в цепях питания элементов схемы используются отдельные стабилизаторы напряжения.

В предлагаемой конструкции для регистрации положения пальцев руки человека используется тензометрический датчик, преобразующий величину деформации в удобный для измерения электрический сигнал. При сгибании пальцев деформация упругого элемента происходит вместе с тензорезистором. Изменение значения сопротивления тензорезистора позволяет судить о силе воздействия на датчик, а следовательно, и об угле сгибания пальца. В качестве чувствительного элемента датчика используется материал Velostat (велостат) [5] – тензорезистивный материал, изготавливаемый из полиолефина (полимерной пленки), пропитанный сажей.

Данный материал обладает следующими преимуществами перед другими тензорезистивными датчиками давления и сгибания, заключающимися в низкой стоимости, компактных размерах, стойкости к изменениям температуры окружающей среды (от $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$), объемным сопротивлением более 500 Ом/см и поверхностным сопротивлением более 31 кОм/см².

Изменение значения выходного напряжения с датчика лежит в узком диапазоне, поэтому для точного определения положения пальцев рук требуется усилить напряжение выходного сигнала и привести его уровень к значению входного напряжения аналогово-цифрового преобразователя.

В качестве усилительного элемента используется распространенная микросхема «четверенного» ОУ – LM358 [6], отличительными свойствами которой являются высокое быстродействие, высокое входное сопротивление, обеспечиваемое наличием на его входе полевых транзисторов, малое энергопотребление, низкий уровень шума, а также возможность работать с входными напряжениями, близкими по уровню к напряжению питания.

Сигналы от тензорезистивных датчиков ТД₁ – ТД₅ поступают на мультиплексор, используемый для коммутации входных сигналов на единый АЦП. В данном случае используется аналоговый мультиплексор. Оптимальным вариантом по количеству входов/выходов используется мультиплексор 74НС4051, позволяющий использовать его в качестве мультиплексора и демультимплексора [7].

Для дальнейшей обработки значения напряжений от ТД₁ – ТД₅ преобразуются в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя, реализованного на микросхеме ADC121C021 [8, 9], представляющего собой 12-битный АЦП, работа которого основана на регистре последовательного приближения. В свою очередь, микросхема ADC121C021 за счет низкого энергопотребления и малых габаритах корпуса является весьма удачным для использования данного преобразователя в составе оборудования, работающего с маломощными источниками питания.

В связи с тем, что технические условия в нашем случае не предъявляют особых требований к микроконтроллеру, то выбор последнего определяется в основном только критериями разрабатываемого устройства, т.е. требуется, чтобы используемый контроллер с интерфейсом I2C для подключения АЦП обладал достаточным количеством выводов для подключения прочей периферии. Предпочтительным в данном случае является 8-битный AVR микроконтроллер ATtiny85, обладающий к тому же низким энергопотреблением [9].

Питание отдельных узлов стабилизируемым напряжением обеспечивается стабилизатором напряжения линейного типа, основным требованием выбора которого является “малое” падение напряжения и фиксированный уровень его выходного напряжения. В нем также

должно быть обеспечено ограничение по силе потребляемого тока и тепловая защита в виде отключения при его перегреве. Указанным требованиям соответствует стабилизатор на микросхеме LM1117-ADJ [10], являющийся линейным стабилизатором с выходным напряжением 3,3 В, падением напряжения 1,2 В при токе нагрузки до 800 мА.

В качестве зарядного устройства используется TP4056 [11], являющееся линейным зарядным устройством напряжения постоянного тока для одноэлементных литий-ионных аккумуляторов.

В качестве приемного и передающего устройств используется Bluetooth модуль HC-05 [12], подходящий по всем параметрам. Модуль также может использоваться для передачи данных с аналогичным Bluetooth-модулем.

В отличие от микроконтроллера, используемого в передающей части, в приемной части необходимо использовать более функциональный микроконтроллер, обладающий большим набором подключаемых периферийных устройств, а также большим числом выводов и объемом памяти. Данный микроконтроллер также взят из линейки AVR фирмы Atmel и используется модель ATmega328P [13], являющаяся маломощным 8-разрядным КМОП-микроконтроллером, основанным на улучшенной архитектуре.

Для регулирования значения выходных параметров, передаваемых на сервоприводы с выхода микроконтроллера приемной части, используется ШИМ-контроллер [14] с питающим напряжением 3,3–5 В, тактовой частотой 25 МГц. Обладающий к тому же возможностью подключения к нему не менее пяти сервоприводов с типом интерфейса I2C, обеспечивающего их когерентную работу с микроконтроллером, с учетом сказанного предпочтение в использовании отдано ШИМ-контроллеру PCA9685 [15].

Для обеспечения подвижности роботизированной кисти используются серводвигатели типа MG995 [16], управляемые выходными сигналами ШИМ-контроллера, представляющие собой сигнал с широтно-импульсной модуляцией. Выбор последних также осуществлялся с учетом их веса и размера.

Для формирования исходных управляющих сигналов была разработана перчатка с тензорезистивными датчиками и конструкция роботизированной кисти руки человека, оснащенной сервоприводами, обрабатывающими сигналы датчиков, в результате чего происходит повторение роботизированной кистью движений перчатки с датчиками. Последняя не вызывает дискомфорта, не сковывает движения кисти руки и не нарушает ее естественного движения. Готовые тензорезистивные датчики фиксируются клейкой лентой к наружной поверхности кисти руки человека – оператора. Размеры электронной платы передающей части системы позволяют зафиксировать ее корпус непосредственно на наружной поверхности перчатки. Внешний вид перчатки с датчиками и корпусом передающей части представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид перчатки с датчиками

Изготовление роботизированной кисти и руки осуществлено на 3D-принтере с последующей сборкой. Печать осуществлялась на 3D-принтере марки CuberX [17] поэлементно с использованием файлов stl формата, предназначенных для хранения трехмерных моделей объектов, используемых в аддитивных технологиях, спроектированных в программах моделирования «Компас 3D» и ADEM CAD [18]. Элементы крепятся друг к другу шарнирами. Сборка конструкции производилась с помощью стандартных инструментов: отверток, ключей, при этом узлы сочленения обеспечивают минимальное трение. Движение элементами кисти (фалангами пальцев) механической руки осуществляется серводвигателями путем изменения длины капроновой нити, пропущенной внутри элементов, попеременно увеличивающих или

сокращающих ее длину в строгом соответствии с положением датчиков на перчатке кисти человека – оператора. Соответственно сервоприводы подключаются к микроконтроллеру и источнику питания.

Вид роботизированного устройства, алгоритм работы которого описан выше, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид роботизированной кисти руки

Заключение

В ходе работы был разработан блок управления роботизированным устройством, позволяющий дистанционно управлять роботизированной кистью руки. Также были разработаны необходимые электрические схемы, состоящие из современных аналоговых устройств и элементов, цифровых интегральных микросхем и микроконтроллеров, произведен выбор методов и компонентов для практической реализации предлагаемого блока управления.

Отличительными достоинствами последнего среди аналогов являются: современные методы реализации и экологичность производства компонентов, дешевизна используемых средств связи и программной обработки информации и сигналов управления, а также весьма достаточная перспектива использования его в качестве прототипа при разработке аналогичных устройств, решающих подобные задачи.

Список литературы

1. Промышленный робот-манипулятор «Birbi M». URL: <https://bid.life/?yclid=674174233512011652#birbi>
2. Сайт производителя промышленных роботов «АРКОДИМ-Про». URL: <https://www.arkodimpro.ru/>
3. Буньгин Е. В., Петрунин А. Р., Чайковский В. М. Устройство обработки сигналов тензорезистивного датчика // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 232–234.
4. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. М. : Техносфера, 2012. 624 с.
5. Технология flex sensor. URL: https://radal.ru/manufacturer/adafruit_industries_llc/
6. Авербух В. Д. Операционные усилители и компараторы. М. : Додэка-XXI, 2001. 560 с.
7. Усольцев А. А. Общая электротехника : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. 301 с.
8. Волович Г. И., Ежов В. Б. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник. М. : Додэка-XXI, 2005. 423 с.
9. Топильский В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. М. : Техносфера, 2014. 288 с.
10. Технический паспорт LM1117-ADJ. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf> ts = 1608758805612
11. Сайт производителя зарядного модуля TP4056. URL: <http://www.tp-asic.com/>
12. Сайт производителя Bluetooth-модуля HC-05. URL: <https://amperka.ru/product/troyka-bluetooth-hc-05>
13. Белов А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. СПб. : Наука и Техника, 2005. 256 с.
14. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника : учеб. пособие. Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
15. ШИМ-контроллер PCA9685. URL: <https://www.nxp.com/products/power-management/lighting-driver-and-controller-ics/ic-led-controllers/16-channel-12-bit-pwm-fm-plus-ic-bus-led-controller:PCA9685>
16. Сервопривод MG995. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/servo-mg995/>
17. Описание и технические характеристики 3D-принтеров марки CuberX. URL: <https://3dtoday.ru/3d-printers/3d-systems/cubex/>
18. Официальный сайт программы моделирования «Компас 3D». URL: <https://kompas.ru/>

References

1. *Promyshlennyy robot-manipulyator «Birbi M» = Industrial robot manipulator "Birbi M"*. (In Russ.). Available at: <https://bid.life/?yclid=674174233512011652#birbi>
2. *Sayt proizvoditelya promyshlennykh robotov «ARKODIM-Pro» = Website of the manufacturer of industrial robots "ARKODIM-Pro"*. (In Russ.). Available at: <https://www.arkodimpro.ru/>
3. Bunygin E.V., Petrunin A.R., Chaykovskiy V.M. Signal processing device of a strain-resistive sensor. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:232–234. (In Russ.).
4. Sharapov V. M., Polishchuk E. S. (eds.). *Datchiki: spravochnoe posobie = Sensors : a reference guide*. Moscow: Tekhnosfera, 2012:624. (In Russ.).
5. *Technology flex sensor*. Available at: https://radal.ru/manufacturer/adafruit_industries_llc/
6. Averbukh V.D. *Operatsionnye usiliteli i komparatory = Operational amplifiers and comparators*. Moscow: Dodeka-XXI, 2001:560. (In Russ.).
7. Usol'tsev A.A. *Obshchaya elektrotekhnika: uchebnoe posobie = General electrical engineering: a textbook*. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2009:301. (In Russ.).
8. Volovich G.I., Ezhov V.B. *Mikroskhemy ATsP i TsAP: spravochnik = ADC and DAC chips: reference*. Moscow: Dodeka-XXI, 2005:423. (In Russ.).
9. Topil'skiy V.B. *Skhemotekhnika analogo-tsifrovyykh preobrazovateley = Circuit design of analog-to-digital converters*. Moscow: Tekhnosfera, 2014:288. (In Russ.).
10. *Tekhnicheskij pasport LM1117-ADJ = Technical data sheet LM1117-ADJ*. (In Russ.). Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf> ts = 1608758805612
11. *Sayt proizvoditelya zaryadnogo modulya TP4056 = Website of the manufacturer of the TP4056 charging module*. (In Russ.). Available at: <http://www.tp-asic.com/>
12. *Sayt proizvoditelya Bluetooth-modulya HC-05 = Website of the manufacturer of the HC-05 Bluetooth module*. (In Russ.). Available at: <https://amperka.ru/product/troyka-bluetooth-hc-05>
13. Belov A.V. *Konstruirovaniye ustroystv na mikrokontrollerakh = Designing devices on microcontrollers*. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2005:256. (In Russ.).
14. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A. *Preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie = Transformative technology: a textbook*. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2009:425. (In Russ.).
15. *Shim-kontroller PCA9685*. Available at: <https://www.nxp.com/products/power-management/lighting-driver-and-controller-ics/ic-led-controllers/16-channel-12-bit-pwm-fm-plus-ic-bus-led-controller:PCA9685>
16. *Servoprivod MG995*. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/servo-mg995/>
17. *Opisanie i tekhnicheskie kharakteristiki 3D-printerov marki CuberX = Description and technical characteristics of CuberX brand 3D printers*. (In Russ.). Available at: <https://3dtoday.ru/3d-printers/3d-systems/cubex/>
18. *Ofitsial'nyy sayt programmy modelirovaniya «Kompas 3D» = Official website of the Compass 3D modeling program*. (In Russ.). Available at: <https://kompas.ru/>

Информация об авторах / Information about the authors

Егор Валерьевич Буньгин

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Egor V. Bunygin

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

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Victor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of sub-department
of radio engineering and radio electronic 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 29.03.2021

Поступила после рецензирования / Revised 05.04.2021

Принята к публикации / Accepted 15.04.2021

УДК 615.47:616-072.7

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-7

БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА К ЭКВИВАЛЕНТНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ГЕНЕРАТОРУ СЕРДЦА ДЛЯ ЗАДАЧ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

М. Н. Крамм

Национальный исследовательский университет, Москва, Россия
KrammMN@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В задаче повышения эффективности неинвазивной кардиодиагностики важен вопрос о локализации мелких пространственных областей электрической активности сердца. Для перехода от карт потенциала на поверхности торса, не позволяющих отразить такие области, к зоне миокарда необходимо располагать адекватной электрической моделью сердца. Биоэлектрические основы построения таких моделей рассматриваются в данной статье. *Материалы и методы.* Анализируются подходы к определению электрического поля, создаваемого ансамблем кардиомиоцитов миокарда в проводящей среде торса. *Результаты.* Проведено биоэлектрическое обоснование перехода от элементарных источников электрического поля при прохождении волны возбуждения в ансамбле кардиомиоцитов сердечной мышцы к эквивалентному электрическому генератору сердца. *Выводы.* Результаты ориентированы на построение цифрового двойника сердца путем обработки сигналов множественных кардиоотведений, что позволяет получать пространственно-временные характеристики электрической активности сердца в информационных системах неинвазивной кардиодиагностики.

Ключевые слова: электрическая активность сердца, миокард, кардиомиоцит, торс, электрический потенциал, эквивалентный электрический генератор, неинвазивная кардиодиагностика

Для цитирования: Крамм М. Н. Биоэлектрические особенности перехода к эквивалентному электрическому генератору сердца для задач неинвазивной электрокардиодиагностики // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 53–59. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-7

BIOELECTRIC FEATURES OF TRANSITION TO EQUIVALENT ELECTRIC HEART GENERATOR FOR NON-INVASIVE ELECTROCARDIODIAGNOSTICS

M.N. Kramm

National Research University, Moscow, Russia
KrammMN@mail.ru

Abstract. *Background.* In the task of increasing the efficiency of non-invasive electrocardiology, the question of localization of small spatial areas of heart electrical activity is important. The potential maps on the torso surface do not allow reflecting such areas, so, for the transition to the myocardium zone, it is necessary to have an adequate electrical model of the heart. The bioelectrical foundations of building such models are discussed in this article. *Materials and methods.* The approaches to the determination of the electric field, created by the ensemble of myocardial cardiomyocytes in the torso conductive medium, are analyzed. *Results.* We conduct a bioelectrical substantiation of the transition from elementary sources of an electric field, during the passage of an excitation wave in the ensemble of the heart muscle cardiomyocytes, to an equivalent electric heart generator. *Conclusions.* The results are targeted on the construction of a heart digital twin by processing signals from multiple cardiac leads, which makes it possible to obtain the spatio-temporal characteristics of the heart electrical activity in information systems of non-invasive cardiac diagnostics.

Keywords: electrical activity of the heart, myocardium, cardiomyocyte, torso, electrical potential, equivalent electrical generator, non-invasive cardio diagnostics

For citation: Kramm M.N. Bioelectric features of transition to equivalent electric heart generator for non-invasive electrocardiodiagnostics. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 53–59. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-7

Введение

Современная неинвазивная электрокардиология широко использует информационные технологии, обеспечивающие регистрацию, сбор, хранение и обработку кардиографической информации. Запись и обработка сигналов множественных кардиоотведений на поверхности сердца позволяют напрямую получить карты распределения электрического потенциала на поверхности торса человека (КППТ) [1]. Однако в связи с ослаблением мелких деталей на КППТ целесообразно вычислительным путем получить пространственно-временные характеристики электрической активности миокарда на поверхности или в объеме сердца. Поэтому актуальным является решение обратной задачи электрокардиографии путем реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), что позволяет неинвазивным способом визуализировать характеристики электрической активности в области сердца [2, 3]. Важным является вопрос о связи биоэлектрических процессов в миокарде с пространственно-временными характеристиками ЭЭГС. Этот вопрос существенен, во-первых, для обоснования адекватности использования ЭЭГС при описании электрической активности сердца и, во-вторых, для интерпретации характеристик миокарда при проведении неинвазивной электрокардиодиагностики (НКД).

Постановка задачи

Важнейшая в работе сердечно-сосудистой системы сократительная функция миокарда обеспечивается синхронизированной передачей возбуждения в специализированных клетках миокарда – кардиомиоцитах [4]. Электрокардиографический сигнал (ЭКС), снимаемый с электродов, размещенных на поверхности торса, является характеристикой электрического поля, создаваемого биоэлектрическими и биохимическими процессами в огромном количестве кардиомиоцитов (КМ). Так, при типичных длине КМ 100 мкм, диаметре КМ 20 мкм получаем объем одного КМ порядка $3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$, что при среднем объеме мышцы миокарда около $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ дает при плотной упаковке КМ оценку их количества $N_{\text{кмц}} \sim 10^9$. В текущей фазе кардиоцикла активна часть КМ, порядка 10^7 .

Приведенные оценки говорят о невозможности для диагностики определить электрическое состояние отдельных КМ, даже при внутрисердечной эндокардиальной регистрации электрограмм с помощью внутрисердечных катетеров [5]. Таким образом, для оценки электрического состояния сердца при электрокардиодиагностике целесообразно переходить к определению характеристик электрической активности отдельных участков поверхности или объема сердца. В трудах Л. И. Титомира [6, 7] предложен подход к описанию электрической активности сердца с помощью концепции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). В рамках данного подхода необходимо рассмотреть основные положения, определяющие переход от источников электрического поля в КМ к эквивалентным источникам электрической активности в ЭЭГС. Целью перехода является уменьшение количества элементов в описании источников электрического поля сердца для обеспечения возможности диагностики состояния этих элементов.

Биоэлектрические источники электрического поля миокарда

Электрическая активность сердца обусловлена функционированием кардиомиоцитов в сердечной мышце. На рис. 1 показан фрагмент сердечной мышцы [8]. Передача возбуждения от одного кардиомиоцита к другому происходит с помощью нексусов – мембран, пронизанных специальными каналами, которые обеспечивают высокую проницаемость нексусов для ионов и, следовательно, быстрое проведение возбуждения между кардиомиоцитами.

На рис. 2,а схематически показано распространение возбуждения в миокарде в направлении эпикарда, причем показаны только внешние заряды на мембранах КМ, внутри заряды ионов имеют противоположный знак. В соответствии с рис. 2,а принято, что верхний КМ уже полностью деполяризован, нижний КМ находится в состоянии покоя (полностью реполяризован), а средний КМ находится в фазе формирования потенциала действия, т.е. в результате открытия мембранных каналов протекает диффузионный ионный ток, перезаряжающий мембрану, и потенциал эпикарда повышается. В процессе реполяризации процесс происходит в обратном направлении по сравнению с рис. 2,а.

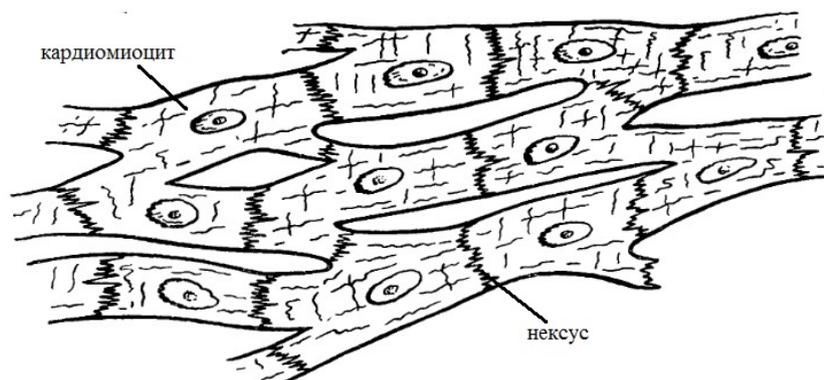


Рис. 1. Ансамбль кардиомиоцитов [8]

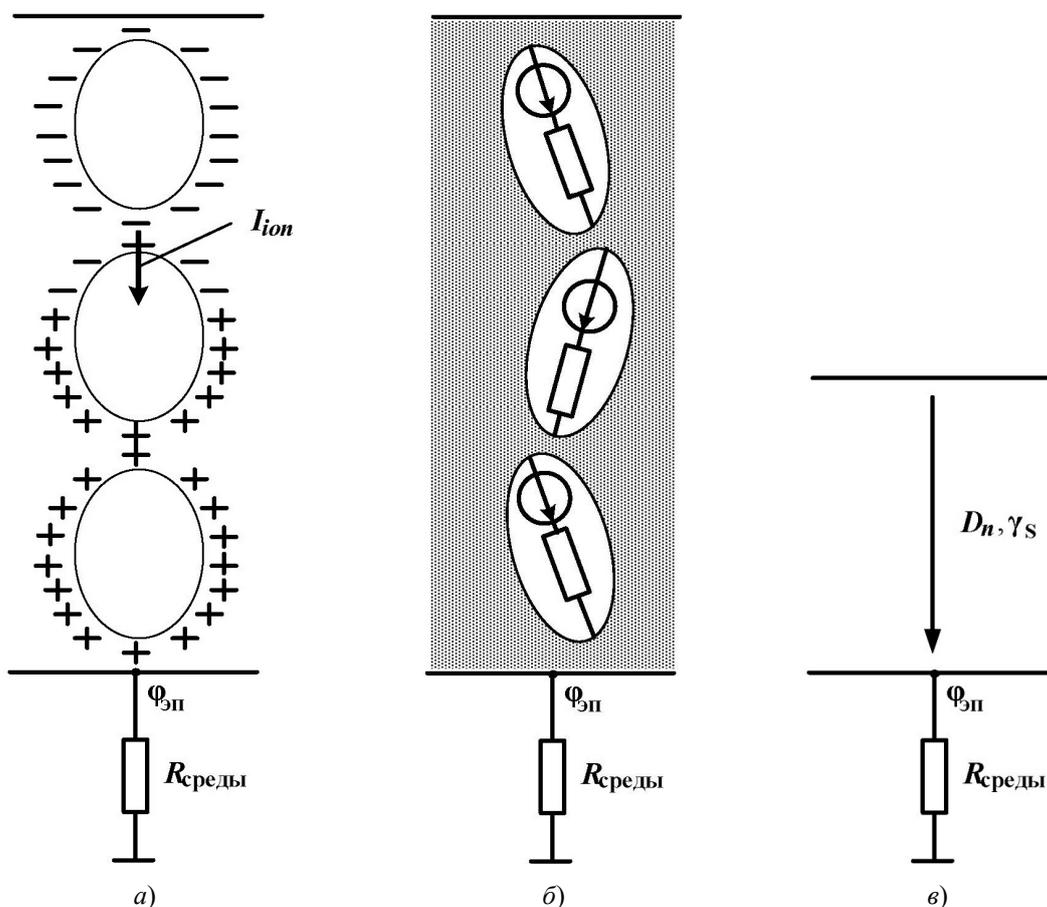


Рис. 2. Переход от ансамбля кардиомиоцитов к ЭЭГС на участке эпикарда:
 а – передача возбуждения между КМ; б – электрические источники в КМ;
 в – эквивалентный генератор на участке эпикарда

Существенным моментом является тот факт, что описанный процесс происходит в результате затрат биохимической энергии в КМ, депонируемой в комплексах АТФ и необходимой для работы активного транспорта ионов через мембрану и тем самым для создания разности концентраций основных ионов (натрий, калий, хлор) в состоянии покоя. Таким образом, миокард содержит ансамбль большого количества источников электрического поля, связанных друг с другом, распределенных в пространстве и изменяющих свою активность в процессах перемещения фронтов возбуждения в миокарде, т.е. в процессах деполяризации и реполяризации (см. рис. 2,б).

В курсах основ электротехники рассматриваются теоремы Тевенина и Нортона [9], позволяющие заменить действие части схемы, содержащей ансамбль источников действием одного электрического источника или эквивалентного электрического генератора. При этом

важно, что электрический режим во внешней части схемы, подключенной к данной части схемы, не изменяется. Данный подход можно использовать для ансамбля источников на рис. 2,б, перейдя к эквивалентному электрическому генератору (ЭЭГ), соответствующему участку внешней поверхности миокарда (эпикард) и описываемому на данном участке поверхностной плотностью дипольных и униполярных моментов D_n и γ_S соответственно (см. рис. 2,б).

Если представить поверхность эпикарда в виде совокупности участков (или граничных элементов), то нужно перейти к итоговому эквивалентному электрическому генератору сердца (ЭЭГС), рассматривая его как ансамбль ЭЭГ отдельных участков (рис. 3). При этом имеют важное значение ориентация участка эпикарда и координаты этого участка.

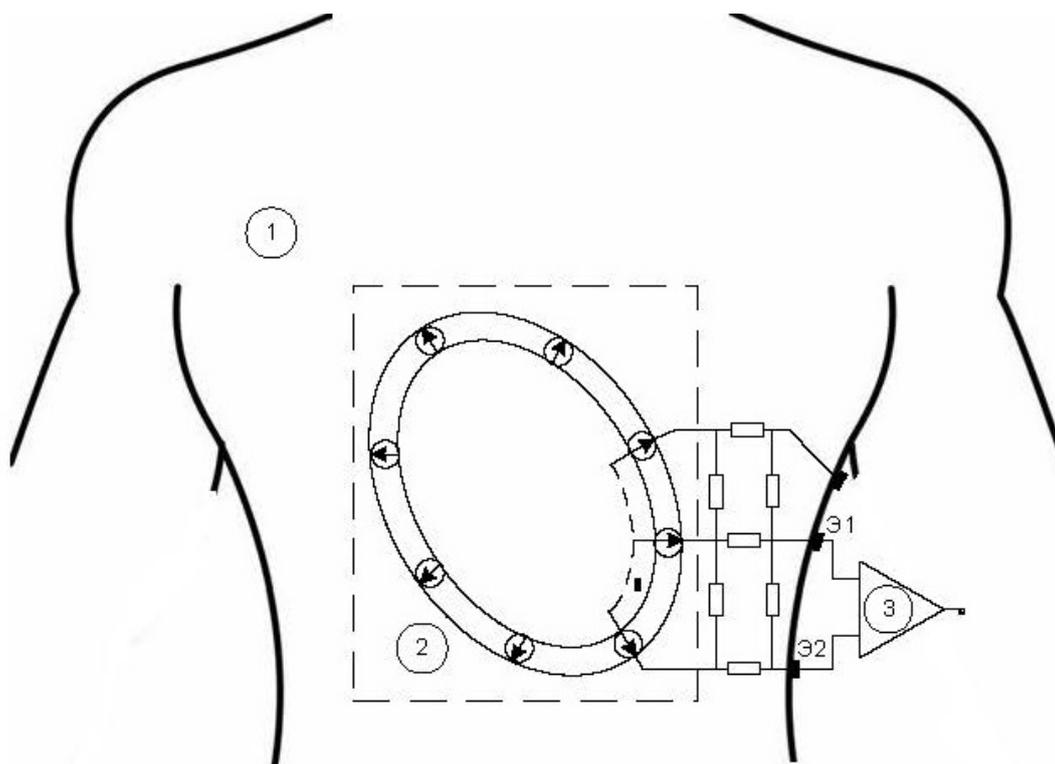


Рис. 3. Использование ЭЭГС поверхностного типа при исследовании ЭКС:
1 – торс; 2 – ЭЭГС; 3 – устройство съема и регистрации разности потенциалов; Э1 и Э2 – электроды

Мы получаем ЭЭГС поверхностного типа [3], представляющий собой распределенную на поверхности эпикарда совокупность электрических источников (см. рис. 3). Создаваемое данными источниками суммарное электрическое поле порождает токи, которые протекают в проводящих биотканях, окружающих эпикард ($R_{\text{среды}}$ на рис. 2). Электрическое поле принято регистрировать, используя распределение электрического потенциала на поверхности торса. На рис. 3 схематически показано использование ЭЭГС при исследовании электрического поля человека с позиций электротехнического описания процесса измерений. Здесь учтено, что торс представляет собой проводящую среду, что отражается резисторами (для простоты показаны на участке торса), сопротивление которых зависит от геометрии поверхностей торса и эпикарда и от удельной проводимости биоткани. Измеряемые ЭКС представляют собой изменяющиеся со временем разности электрических потенциалов между точками торса, в которых закреплены электроды.

В основе математического описания ЭЭГС лежит его представление не в виде дискретного ансамбля электрических источников на поверхности эпикарда, а в виде непрерывного поверхностного распределения плотности электрических источников [10].

Основные положения для построения эквивалентных электрических генераторов сердца

Учитывая вышеизложенное, за основу при построении эквивалентных электрических генераторов сердца примем следующие положения:

1. Истинный генератор сердца (ИГС) – ансамбль синхронизированных клеток миокарда, к электрофизиологическим характеристикам которых относятся, прежде всего, трансмембранные потенциалы действия (ТМПД).

2. Эквивалентный электрический генератор сердца (ЭЭГС) с заданной погрешностью аппроксимирует электрический потенциал в области измерений (карты потенциала на поверхности торса – КППТ) или интегральные характеристики КППТ.

3. Следует рассматривать иерархию ЭЭГС: чем ближе ЭЭГС к ИГС, т.е. чем выше уровень ЭЭГС, тем точнее решается прямая задача, тем продуктивнее анализ влияния электрофизиологии отдельных компартментов сердца на ЭКС. Одновременно с этим, чем выше уровень ЭЭГС, тем большим количеством параметров он описывается, тем сложнее решается обратная задача, нужная для диагностики и связанная с определением электрофизиологических характеристик компартментов сердца по измеренным ЭКС.

4. Возрастание сложности решения обратной задачи при повышении уровня ЭЭГС связано с ухудшением устойчивости решения, когда малые отклонения в исходных данных (отсчеты ЭКС, параметры торса, параметры модели) приводят к существенным отклонениям в диагностируемых электрофизиологических характеристиках компартментов сердца.

5. Существует возможность построения ЭЭГС объемного типа, когда плотность источников задана по объему сердца. Однако число элементарных генераторов в объеме гораздо больше числа элементов поверхности (граничные элементы), поэтому ЭЭГС объемного типа существенно сложнее ЭЭГС поверхностного типа. Известен комбинированный ЭЭГС, рассматривающий элементарные источники на поверхностях компартментов сердца, но для реализации связи между этими источниками в процессе распространения возбуждения включающий элементы в объеме сердца [11].

6. Существуют ЭЭГС поверхностного типа и точечного (дискретного) типа. Для ЭЭГС поверхностного типа плотность источников задана на определенных поверхностях. ЭЭГС точечного типа – это мультиполь [6, 7], существующий в определенной точке внутри сердца (например, в центре масс сердца). Наиболее распространен в электрокардиологии точечный ЭЭГС дипольного типа [6, 7].

7. Из теоремы Грина следует, что если рассмотреть объем, который занимают сторонние источники поля и который ограничен некоторой замкнутой поверхностью S , то потенциалы, создаваемые этим объемом во внешнем пространстве, однозначно определяются пространственным распределением потенциала и его нормальной производной на этой поверхности S . Отсюда вытекает следующий тезис.

8. ЭЭГС поверхностного типа характеризуются простым и (или) двойным генераторными слоями, на которых заданы поверхностные плотности униполярных и дипольных источников соответственно. С физической точки зрения простой генераторный слой представляет поверхность, на которой задана плотность вытекающего (втекающего) тока. Эта плотность связана с нормальной производной потенциала (производной по направлению нормали к поверхности слоя). Двойной генераторный слой представляет поверхность, на которой задана плотность дипольного момента. Эта плотность связана с величиной трансмембранного потенциала двойного слоя.

9. Если приближенно представить ЭЭГС поверхностного типа на основе двойного генераторного слоя, то он отражает существование изменяющихся зарядов противоположного знака на противоположных поверхностях двойного слоя, что отражает процессы деполяризации и реполяризации мембран клеток.

10. Если разбить внешнюю поверхность двойного слоя на дискретный набор граничных элементов, то ЭЭГС поверхностного типа на основе двойного генераторного слоя может быть представлен ансамблем элементарных диполей, каждый из которых соответствует граничному элементу поверхности двойного слоя и расположен в центре этого граничного элемента.

11. При уменьшении числа граничных элементов поверхности (например, поверхности эпикарда) уменьшается количество элементарных диполей. В пределе мы приходим к одному точечному диполю, эквивалентному исходному ансамблю диполей в смысле создаваемых на поверхности торса измеряемых потенциалов. При этом качество аппроксимации поверхностных потенциалов снижается, однако остается диагностически значимым результирующий дипольный момент и координаты эквивалентного точечного диполя. Этот эквивалентный точечный диполь будем называть ЭЭГС дипольного типа.

12. ЭЭГС поверхностного типа и ЭЭГС дипольного типа представляют собой две крайние связанные между собой концепции описания электрофизиологии сердца. Так, ЭЭГС по-

верхностного типа отражает особенности динамики ТМПД в разных точках поверхности сердца (эпикард), а значит, особенности процессов проводимости (проведения возбуждения) в сердечной мышце. В то же время ЭЭГС дипольного типа отражает общий уровень электрической активности миокарда (модуль результирующего дипольного момента), направление и скорость движения процессов деполяризации и реполяризации (направление вектора дипольного момента и скорость изменения координат диполя).

13. Поскольку оба типа ЭЭГС отражают диагностическую информацию об электрической активности сердца, то представляет практический интерес провести реконструкцию этих ЭЭГС в одном обследовании. Выигрыш заключается также в том, что в обоих случаях используются в качестве исходных данных записанные ЭКС, координаты электродов, антропометрические параметры торса.

14. Сравнительно небольшое количество электродов (40–70) обеспечивает простоту и мобильность обследования.

15. Предварительная обработка зарегистрированных многоканальных ЭКС позволяет привязать геометрическую модель поверхности эпикарда к поверхности торса, что позволит избежать дополнительных затратных методик, связанных с использованием томографического оборудования.

16. Реконструкция ЭЭГС дипольного типа с поиском не только вектора дипольного момента, но и координат единого дипольного источника позволит, во-первых, оптимизировать аппроксимацию измеренных потенциалов на поверхности торса, и, во-вторых, появляется дополнительная электрофизиологическая информация о скорости перемещения электрического центра сердца.

17. Регуляризирующие алгоритмы при реконструкции ЭЭГС обоих типов позволяют получить устойчивое решение обратной задачи электрокардиологии.

Заключение

Распространение автоволны возбуждения в миокарде в результате развития процессов деполяризации и реполяризации в ансамбле кардиомиоцитов может быть, с точки зрения регистрации электрического поля сердца, отражено эквивалентным электрическим генератором сердца (ЭЭГС). Рассмотренные особенности и основные положения для построения эквивалентных электрических генераторов сердца ориентированы на построение цифрового двойника сердца в неинвазивной кардиодиагностике. Основываясь на данных положениях, в работах [2, 12, 13] рассмотрены вопросы реализации алгоритмов реконструкции ЭЭГС поверхностного типа и ЭЭГС дипольного типа, включая выбор количества элементов поверхности торса и эпикарда, количества электродов, режима регуляризации и т.п. Результаты позволяют проводить динамическую визуализацию электрической активности сердца синхронно во времени с ЭКС кардиографических отведений [3].

Список литературы

1. Полякова И. П. Поверхностное ЭКГ-картирование как метод диагностики нарушений ритма сердца // Неинвазивная диагностика в клинической аритмологии : монография. М. : Медицина, 2009. С. 157–175.
2. Патент РФ № 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палютин Ю. А., Стрелков Н. И., Черников А. И. 2018. № 201712361 ; заявл. 05.07.2017, опубл. 18.04.2018.
3. Крамм М. Н. Эквивалентный электрический генератор сердца для неинвазивной электрокардиодиагностики // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 65.
4. Евлахов В. И., Пуговкин А. П., Рудакова Т. Л., Шалковская Л. Н. Основы физиологии сердца. СПб. : СпецЛит, 2015. 336 с.
5. Желяков Е. Г., Ардашев А. В. Эндокардиальное электрофизиологическое исследование // Клиническая аритмология : монография. М. : Медпрактика, 2009. С. 261–312.
6. Титомир Л. И. Электрический генератор сердца. М. : Наука, 1980. 371 с.
7. Титомир Л. И., Кнеппо П. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца. М. : Наука, 1999. 448 с.
8. Титомир Л. И., Трунов В. Г., Айду Э. А. И. Неинвазивная электрокардиотопография. М. : Наука, 2003. 198 с.
9. Баскаков С. И. Лекции по теории цепей. М. : УРСС, 2013. 280 с.

10. Kramm M. N., Zhikhareva G. V., Bodin O. N. [et al.]. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface // 6th International Work-Conference, IWBBIO 2018. Granada, Spain, 2018. Proceedings, Part I.
11. Баум О. В., Волошин В. И., Попов Л. А. Реализация биофизических моделей электрической активности сердца // Биофизика. 2009. Т. 54, № 1. С. 97–113.
12. Крамм М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на результаты реконструкции распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2020. № 1. С. 78–85.
13. Крамм М. Н. Проведение регуляризации при реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца поверхностного типа // Вестник новых медицинских технологий. 2020. Т. 27, № 2. С. 103–106.

References

1. Polyakova I.P. Surface ECG mapping as a method for diagnosing cardiac arrhythmias. *Neinvazivnaya diagnostika v klinicheskoy aritmologii: monografiya = Noninvasive diagnostics in clinical arrhythmology: monograph*. Moscow: Meditsina, 2009:157–175. (In Russ.)
2. Patent Russian Federation № 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa = Patent of the Russian Federation No. 2651068. Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart*. Bodin O.N., Bodin A.Yu., Zhikhareva G.V., Kramm M.N., Palyutina Yu.A., Strelkov N.I., Chernikov A.I. 2018. No. 201712361; appl. 05.07.2017, publ. 18.04.2018. (In Russ.)
3. Kramm M.N. Equivalent electric heart generator for non-invasive electrocardiagnosis. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2020;2:65. (In Russ.)
4. Evlakhov V.I., Pugovkin A.P., Rudakova T.L., Shalkovskaya L.N. *Osnovy fiziologii serdtsa = Fundamentals of heart physiology*. Saint-Petersburg: SpetsLit, 2015:336. (In Russ.)
5. Zhelyakov E.G., Ardashev A.V. Endocardial electrophysiological examination. *Klinicheskaya aritmologiya: monografiya = Clinical arrhythmology: monograph*. Moscow: Medpraktika, 2009:261–312. (In Russ.)
6. Titomir L.I. *Elektricheskiy generator serdtsa = Electric Heart Generator*. Moscow: Nauka, 1980:371.
7. Titomir L.I., Kneppo P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa = Mathematical modeling of a bioelectric heart generator*. Moscow: Nauka, 1999:448. (In Russ.)
8. Titomir L.I., Trunov V.G., Aydu E.A.I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya = Non-invasive electrocardiotopography*. Moscow: Nauka, 2003:198. (In Russ.)
9. Baskakov S.I. *Lektsii po teorii tsepey = Lectures on circuit theory*. Moscow: URSS, 2013:280. (In Russ.)
10. Kramm M.N., Zhikhareva G.V., Bodin O.N. [et al.]. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface. *6th International Work-Conference, IWBBIO 2018*. Granada, Spain, 2018. Proceedings, Part I.
11. Baum O.V., Voloshin V.I., Popov L.A. Implementation of biophysical models of electrical activity of the heart. *Biofizika = Biophysics*. 2009;54(1):97–113. (In Russ.)
12. Kramm M.N. Analysis of the influence of the choice of the number of electrodes on the results of reconstruction of the electric potential distribution on the epicardial surface. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2020;1:78–85. (In Russ.)
13. Kramm M.N. Carrying out regularization in the reconstruction of an equivalent electric generator of the heart of the surface type. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of new medical technologies*. 2020;27(2):103–106. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Николаевич Крамм

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
(Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Mikhail N. Kramm

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of sub-department of fundamentals
of radio engineering,
National Research University
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

УДК 639.3.067

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-8

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А. И. Нефедьев¹, Д. И. Нефедьев², С. А. Безбородов³, В. Г. Гусев⁴

^{1,4} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

¹ nefediev@rambler.ru, ² ndi200106@yandex.ru, ³ sabezborodov@volgmed.ru, ⁴ gusev.vl.g@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При эксплуатации автомобилей водители часто сталкиваются с ситуациями, которые могут привести к серьезным дорожно-транспортным происшествиям. Таким образом, актуальной задачей является разработка системы контроля состояния водителя автомобиля. *Методы и материалы.* Развитие систем контроля показывает, что слежение с помощью видеокамеры только за лицом водителя или фиксации только параметров движения не позволяет точно оценить состояние водителя. Проблемой является надежность распознавания опасного состояния водителя в различных климатических и дорожных условиях. Для решения этой проблемы была разработана система контроля, основанная на сочетании различных датчиков в одной системе. *Результаты.* Для контроля состояния водителя с целью повышения безопасности дорожного движения была разработана система, состоящая из блока управления и двух видеокамер и позволяющая надежно обнаруживать опасное состояние водителя в различных климатических и дорожных условиях. *Выводы.* Таким образом, система контроля водителя позволит обеспечить существенное снижение количества дорожно-транспортных происшествий, особенно на загородных трассах.

Ключевые слова: автомобиль, система контроля, состояние усталости, сон, видеокамера, безопасность

Для цитирования: Нефедьев А. И., Нефедьев Д. И., Безбородов С. А., Гусев В. Г. Контроль состояния водителя во время движения автотранспортного средства // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 60–65. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-8

CONTROL OF THE DRIVER'S CONDITION WHILE DRIVING A CAR

A.I. Nefed'ev¹, D.I. Nefed'ev², S.A. Bezborodov³, V.G. Gusev⁴

^{1,4} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

³ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

¹ nefediev@rambler.ru, ² ndi200106@yandex.ru, ³ sabezborodov@volgmed.ru, ⁴ gusev.vl.g@mail.ru

Abstract. *Background.* When operating cars, drivers often face situations that can lead to serious road traffic accidents (RTA). Thus, an urgent task is to develop a system for monitoring the condition of a car driver. *Materials and methods.* The development of monitoring systems shows that tracking with a video camera only the driver's face or fixing only the movement parameters does not allow an accurate assessment of the driver's condition. The problem is the reliability of recognition of the dangerous state of the driver in various climatic and road conditions. To solve this problem, a monitoring system was developed based on the combination of various sensors in one system. *Results.* To monitor the driver's condition in order to improve road safety, a system has been developed, consisting of a control unit and two video cameras, and allows reliably detecting the dangerous state of the driver in various climatic and road conditions. *Conclusion.* Thus, the driver control system will provide a significant reduction in the number of accidents, especially on suburban roads.

Key words: car, monitoring system, fatigue, sleep, video camera, safety

For citation: Nefediev A.I., Nefediev D.I., Bezborodov S.A., Gusev V.G. Control of the driver's condition while driving a car. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 60–65. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-8

При эксплуатации автомобилей водители часто сталкиваются с ситуациями, которые могут привести к серьезным дорожно-транспортным происшествиям (ДТП). Производители непрерывно совершенствуют автомобили с целью обеспечения комфортного и безопасного их использования.

Состояние усталости водителя существенно снижает безопасность движения и увеличивает в 4 раза риск попадания в ДТП. Вероятность уснуть за рулем при коротких поездках в черте города относительно невелика, но она значительно возрастает из-за переутомления во время длительной поездки. Причем состояние водителя зависит как от времени суток, так и от интенсивности дорожного движения [1].

По статистике до 25 % водителей попадают в ДТП во время длительной поездки, причем усталость является одной из основных причин аварий. У водителя внимание снижается пропорционально времени нахождения за рулем. Согласно опубликованным исследованиям [2], уже через 4 часа вождения время реакции водителя увеличивается в два раза.

При управлении автомобилем требуется высокая концентрация внимания, при этом различные жизненно важные органы водителя испытывают значительную нагрузку. Продолжительные поездки, темное время суток, плохие погодные условия способствуют быстрому накоплению усталости, вызывая ухудшение внимания. Все эти факторы существенно повышают риск возникновения аварийной ситуации [1, 3].

Развитие утомления связано с дефицитом сна, временем суток и характером работы. Основной причиной нарушения любой профессиональной деятельности является усталость, наступление которой происходит незаметно, при этом время реакции водителя увеличивается. При этом снижается внимание и бдительность, что повышает риск возникновения аварийной ситуации.

Вероятность повышения засыпания имеет циркадианный ритм, при этом его максимальные значения достигаются в 6 ч утра. Вероятность ДТП значительно возрастает между 3:00 и 5:00 ч. На риск возникновения ДТП влияет продолжительность бодрствования, продолжительность поездки, наличие/отсутствие остановок для отдыха и т.д. [2].

Существует множество методов оценки состояния водителя во время движения. Наиболее часто состояние водителя определяется с помощью видеонаблюдения. В соответствии с этим методом осуществляется прямой контроль с помощью видеокамеры за мимикой лица и глазами водителя, что дает возможность определить отклонение состояния от нормы по мимике и движению зрачков глаз, отклонению положения головы от вертикального [4].

Крупные автопроизводители автомобилей внимательно относятся к безопасности жизни и здоровья водителя и сохранности его автомобиля и разрабатывают различные системы контроля состояния водителя. Если раньше безопасность водителя обеспечивалась конструкцией автомобиля, наличием ремней и подушек безопасности, то сейчас быстрыми темпами развиваются электронные системы, задачей которых является предотвращение аварийной ситуации на стадии ее зарождения.

В прошлом такие системы контроля в основном являлись информационными и предназначались для оповещения водителя о наступлении состояния утомления. Современные системы контроля получили возможность вмешиваться в процесс управления транспортным средством и предупреждать ДТП.

Современные системы контроля состояния водителя позволяют определять опасное состояние водителя – замедленную реакцию, усталость, сонное состояние и др. Известно много разновидностей таких систем.

Систему контроля водителя впервые разработала и запатентовала японская фирма Nissan в 1977 г. Система анализировала состояние водителя и стиль управления автомобилем. Параметры определялись в начале поездки для оценки скорости реакции водителя, эти значения принимались за эталонные, после этого система контроля непрерывно отслеживала скорость реакции. Если обнаруживалось, что время реакции водителя увеличилось, то подавала звуковое сообщение с рекомендацией отдыха.

Система контроля «Attention Assist» (Mercedes-Benz) работает по принципу слежения за физической возможностью водителя управлять автомобилем и при необходимости информирует его о необходимости остановки и отдыха [5, 6]. Система осуществляет контроль поведенческих факторов: оценка поведения и направление взгляда водителя, движение автомобиля.

Работа системы контроля «DAC» (Volvo) основана на отслеживании характера движения автомобиля и работает совместно с системой предупреждения выезда из полосы движения («LDW»). Состояния усталости у водителя система контроля обнаруживает по отклонению от заданных параметров движения.

Система контроля водителя «Emergency Assist» (фирма Volkswagen) следит за работой рулем и частично перехватывает управление автомобилем при возникновении опасной ситуации. Если система считает, что водитель не в состоянии управлять автомобилем, она перехватывает управление автомобилем, при этом задействуется проактивная система безопасности (натяжение ремня безопасности), останавливает автомобиль и выполняет аварийный вызов [7, 8].

Система контроля фирмы Ford следит за состоянием водителя, за нахождением автомобиля в полосе движения, и распознает дорожные знаки. Оценка состояния водителя производится на основе анализа скорости, продольного и поперечного ускорения автомобиля, действий водителя, дорожных условий и биометрических показателей водителя – температуры тела, частоты сердечных сокращений и частоты дыхательных движений [7, 8].

Существуют два метода построения систем контроля. Первый метод реализуют фирмы Mercedes, Volkswagen, Skoda, Volvo, осуществляя контроль состояния водителя только по параметрам движения автомобиля.

Второй метод контроля состояния водителя используют японские фирмы, анализируя психоэмоциональное состояние водителя. В таких системах используются видекамера, которая фиксирует положение головы, характер движения зрачков глаз, частоту морганий, мимику и жесты водителя, частоту дыхательных движений.

Независимо от метода построения система контроля усталости водителя в течение 15–30 мин после начала движения собирает и анализирует информацию от датчиков и видеокamer, определяет стиль езды водителя и условия дорожного движения. Полученная информация принимается за эталонную, и вся дальнейшая поступающая информация сравнивается с эталонной, что и позволяет распознать состояние усталости водителя [9].

Блок управления собирает и анализирует все данные с датчиков и видеокamer. При выявлении опасного состояния система предупреждает водителя голосовым или звуковым сигналом (при этом может использоваться разная громкость и тональность сигнала в зависимости от уровня опасности). При высоком уровне вероятности аварии блок управления снижает скорость или полностью останавливает автомобиль и включает аварийную сигнализацию.

История развития систем контроля показывает, что слежение с помощью видеокamеры только за лицом водителя или фиксации только параметров движения не позволяет точно оценить состояние водителя. По этой причине развитие систем контроля за состоянием водителя пошло по пути сочетания различных датчиков в одной системе.

Основная цель применения таких систем – своевременное распознавание признаков утомления водителя и выдача предупреждений для обеспечения его безопасности и предотвращения ДТП.

Рассмотрим систему, представленную на рис. 1 и состоящую из следующих основных взаимодействующих компонентов автомобильного транспорта: водитель, автомобиль, дорога и внешняя среда.

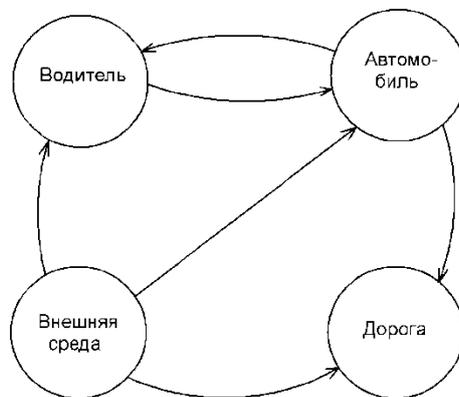


Рис. 1. Система «водитель–автомобиль–дорога–внешняя среда»

К внешней среде относятся время суток, погодные условия, рельеф местности, дорожная инфраструктура, пешеходы, т.е. все, что влияет на движение и находится за пределами автомобиля и оказывает влияние на автомобиль, водителя и дорогу.

Безопасность дорожного движения всецело зависит от всех компонентов, входящих в систему. Очевидно, что получить абсолютно безопасную систему невозможно, поскольку в нее входит водитель, ошибки которого имеют определяющее значение как для качества работы системы, так и для работоспособности системы в целом.

Безопасность дорожного движения в значительной степени зависит от технического состояния автомобиля, состояния водителя, трафика, а также от состояния внешней среды. Вероятность аварийного состояния $P_{ав}$ можно определить как

$$P_{ав} = P_{ac} + P_{cb} + P_{oc},$$

где P_{ac} – вероятность аварийного состояния автомобиля; P_{cb} – вероятность опасного состояния водителя; P_{oc} – вероятность опасного состояния внешней среды.

В существующих системах сбор данных о состоянии водителя часто осуществляется с помощью датчиков, установленных в салоне автомобиля на руле (датчики пульса, проводимости и температуры) и на лобовом стекле (видеокамера). Система контроля состояния водителя на основе анализа полученных данных выявляет отклонения от заданных значений и на основе полученной информации либо предупреждает водителя, либо останавливает автомобиль.

Основная проблема таких систем заключается в том, что зимой большинство датчиков или не работает, или передает в блок управления некорректную информацию. Например, при низкой температуре окружающей среды водитель может надеть перчатки, что делает невозможным измерение температуры, проводимости и пульса датчиками, расположенными на руле. Многие современные автомобили имеют функцию подогрева руля, что также делает невозможным измерение температуры с помощью датчиков на руле. При ярком солнечном свете водитель может находиться в солнцезащитных очках, при этом слежение за зрачками его глаз также невозможно. Таким образом, условия внешней среды могут блокировать работу системы контроля состояния водителя, в состав которой входят указанные датчики.

Из всего многообразия параметров, позволяющих прямо или косвенно оценить состояние водителя, должны быть выбраны минимально необходимые параметры, которые позволяют с высокой степенью вероятности обнаружить усталость, момент засыпания или неадекватное состояние водителя. К числу таких параметров можно отнести скорость и ускорение автомобиля, положение педали акселератора, положение рук на руле, положение головы, наличие зевоты и контроль полосы движения [9].

Для контроля состояния водителя с целью повышения безопасности дорожного движения была разработана система, структурная схема которой представлена на рис. 2.

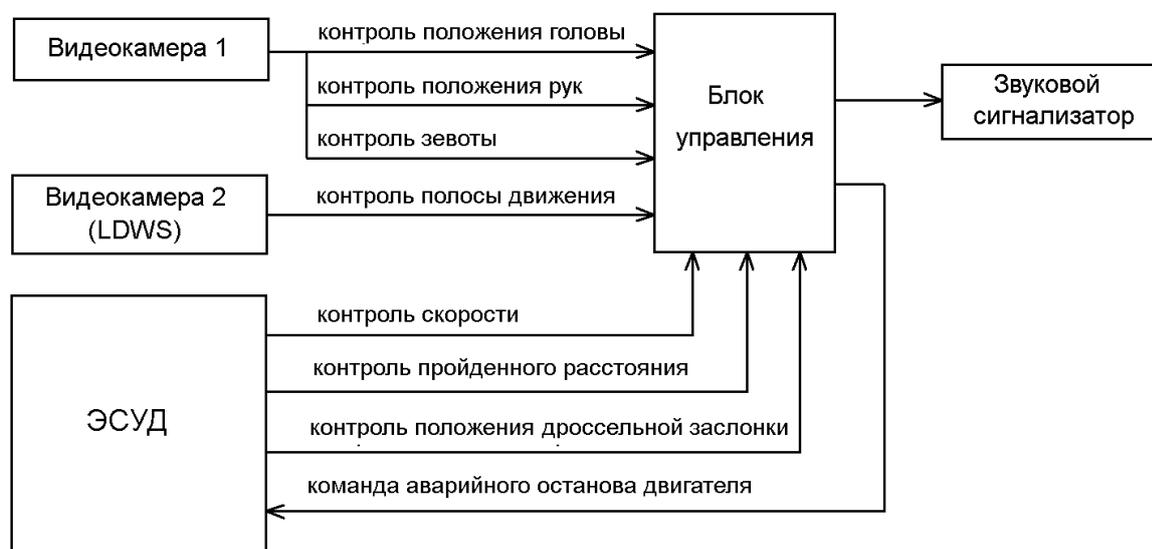


Рис. 2. Система контроля состояния водителя

Блок управления обрабатывает информацию, поступающую от двух видеокамер и от электронной системы управления двигателем (ЭСУД). Видеокамера 1 установлена в салоне автомобиля и предназначена для контроля положения головы водителя, контроля положения рук и контроля зевоты. При засыпании водителя или при его плохом состоянии голова часто наклоняется вперед или вбок. Если голова водителя находится в таком положении более 3 с, блок управления через звуковой сигнализатор выдаст предупреждающий сигнал.

Видеокамера 2 установлена за салонным зеркалом заднего вида и выполняет функции слежения за дорожной обстановкой, в том числе за выходом автомобиля из полосы движения (Lane Departure Warning System – LDWS). От ЭСУД поступает информация о скорости автомобиля, о положении дроссельной заслонки, о пройденном расстоянии.

Если положение головы, положение рук выходят за разрешенный диапазон или обнаруживается зевота, блок управления подает звуковой сигнал, и если водитель не изменил позы и никак не отреагировал на сигнал блока управления, то через некоторое время после подачи звукового сигнала блок управления останавливает автомобиль, подавая на ЭСУД команду аварийного останова двигателя и включая аварийную сигнализацию. Таким образом, система контроля состояния водителя позволяет обнаружить начальную стадию ухудшения состояния водителя, что позволит предотвратить ДТП.

Безопасность дорожного движения является безусловным приоритетом при разработке различных систем контроля состояния водителя. Системы контроля усиливают бдительность водителя с помощью звуковых сигналов, выдают рекомендации для отдыха после определенного времени нахождения за рулем или при обнаружении сильной усталости, что позволяет существенно снизить количество ДТП, особенно на загородных трассах.

Список литературы

1. Система распознавания усталости водителя. URL: <http://znanieavto.ru/komfort/datchik-ustalosti-voditelya.html> (дата обращения: 10.03.2021).
2. Дементенко В. В., Дорохов В. Б. Оценка эффективности систем контроля уровня бодрствования человека оператора с учетом вероятностной природы возникновения ошибок при засыпании // Журнал высшей нервной деятельности. 2013. Т. 63, № 1. С. 24–32.
3. Система контроля состояния водителя. URL: <http://systemsauto.ru/active/monitoring-condition-driver.html> (дата обращения: 10.03.2021).
4. Williamson A., Lombard D. A., Folkard S. [et al.]. The link between fatigue and safety // *Accid. Anal. Prev.* 2011. Vol. 43, № 2. С. 498–515.
5. Герус С. В., Дементенко В. В., Шахнарович В. М. Система мониторинга состояния водителя и безопасность на автомобильном транспорте // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2009. № 8. С. 46–52.
6. Шок-исследование: каждый третий водитель хотя бы раз засыпал за рулем. URL: <https://www.zr.ru/content/news/907509-kazhdyj-tretij-voditel-v-rossii/> (дата обращения: 10.03.2021).
7. Утомление и усталость водителя – причина аварий и автокатастроф. URL: <https://www.drive2.ru/c/564657/> (дата обращения: 10.03.2021).
8. Самофалов, И. В., Нефедьев А. И. Интеллектуальная система контроля психоэмоционального состояния водителя автотранспортного средства // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 2. С. 46–49.
9. Бонч-Бруевич В. В., Дементенко В. В., Кремез А. С., Макаев Д. В. Дистанционный контроль бодрствования водителя в рейсе // Автоматизация в промышленности. 2015. № 2. С. 33–35.

References

1. *Sistema raspoznavaniya ustalosti voditelya = Driver fatigue recognition system.* (In Russ.). Available at: <http://znanieavto.ru/komfort/datchik-ustalosti-voditelya.html> (accessed 10.03.2021)
2. Dementienko V.V., Dorokhov V.B. Evaluation of the effectiveness of systems for monitoring the level of wakefulness of a human operator, taking into account the probabilistic nature of errors when falling asleep. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti = Journal of Higher Nervous Activity.* 2013;63(1):24–32. (In Russ.)
3. *Sistema kontrolya sostoyaniya voditelya = Driver status monitoring system.* (In Russ.). Available at: <http://systemsauto.ru/active/monitoring-condition-driver.html> (accessed 10.03.2021).
4. Williamson A., Lombard D.A., Folkard S. [et al.]. The link between fatigue and safety. *Accid. Anal. Prev.* 2011;43(2):498–515.
5. Gerus S.V., Dementienko V.V., Shakhnarovich V.M. Driver status monitoring system and safety in road transport. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika = Biomedical technologies and radio electronics.* 2009;8:46–52. (In Russ.)

6. *Shok-issledovanie: kazhdy tretiy voditel' khotya by raz zasypal za rulem = Shock study: every third driver has fallen asleep at the wheel at least once.* (In Russ.). Available at: <https://www.zr.ru/content/news/907509-kazhdj-tretij-voditel-v-rossi/> (accessed 10.03.2021).
7. *Utomlenie i ustalost' voditelya – prichina avariij i avtokatastrof = Fatigue and fatigue of the driver-the cause of accidents and car accidents.* (In Russ.). Available at: <https://www.drive2.ru/c/564657/> (accessed 10.03.2021).
8. Samofalov I.V., Nefed'ev A.I. Intelligent system for monitoring the psychoemotional state of a motor vehicle driver. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport = Energy and resource conservation: industry and transport.* 2020;2:46–49. (In Russ.)
9. BonchBruevich V.V., Dementienko V.V., Kremez A.S., Makaev D.V. Remote monitoring of the driver's wakefulness during the flight. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry.* 2015;2: 33–35. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Иванович Нефедьев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28)
E-mail: nefediev@rambler.ru

Alexei I. Nefed'ev

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department
of electrical engineering,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

Дмитрий Иванович Нефедьев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ndi200106@yandex.ru

Dmitry I. Nefed'ev

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

Сергей Александрович Безбородов

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой биотехнических систем
и технологий,
Волгоградский государственный медицинский
университет
(Россия, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1)
E-mail: sabezborodov@volgmed.ru

Sergey A. Bezborodov

Candidate of technical sciences,
head of sub-department of biotechnical systems
and technologies,
Volgograd State Medical University
(1 Pavshikh Bortsov square, Volgograd, Russia)

Владимир Георгиевич Гусев

аспирант,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28)
E-mail: gusev.vl.g@mail.ru

Vladimir G. Gusev

Postgraduate student,
Volgograd State Technical University
(28 V.I. Lenin avenue, Volgograd, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 681.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-9

ОБРАЗ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ К ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКЕ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Н. В. Леонидов¹, М. В. Митина²

^{1,2} АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», Железногорск, Россия

^{1,2} Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

^{1,2} nleonidov_isi@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель данной статьи – популяризация идеи внедрения низкоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС и освещение предпосылок для создания и использования малых космических аппаратов, возникших в недавнее время. *Материалы и методы.* Анализ текущего состояния проведен в контакте с ведущими экспертами по данной тематике и на основании зарубежных публичных заявлений, в том числе из материалов международных конференций. *Результаты и выводы.* Освещены назревшие проблемы системы и предложен один из новых вариантов их решения. Можно предположить, что в ближайшие годы малые космические аппараты и низкоорбитальные группировки, состоящие из большого числа таких аппаратов, создадут и займут совершенно новую нишу на рынке спутниковых услуг с возможным постепенным вытеснением своих более крупных собратьев. Условия для этого возникнут естественным путем: экономическая целесообразность, эксплуатационное удобство и т.п. В то же время целесообразность внедрения низкоорбитального дополнения на основе малых космических аппаратов к системе ГЛОНАСС требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, малые космические аппараты, низкоорбитальное дополнение, орбитальная группировка, предпосылки, точность

Для цитирования: Леонидов Н. В., Митина М. В. Образ низкоорбитального дополнения к орбитальной группировке системы Глонасс // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 66–70. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-9

IMAGE OF LOW-ORBITAL ADDITION TO ORBITAL CONSTELLATION GLONASS SYSTEM

N.V. Leonidov¹, M.V. Mitina²

^{1,2} JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev, Zheleznogorsk, Russia

^{1,2} Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

^{1,2} nleonidov_isi@inbox.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this article is to popularize the idea of introducing a low-orbit supplement to the GLONASS system and to highlight the prerequisites for the creation and use of small spacecraft that have emerged recently. *Materials and methods.* The analysis of the current state was carried out in contact with leading experts on this topic and on the basis of foreign public statements, including from the materials of international conferences. *Results and conclusions.* The text of the article highlights the urgent problems of the system and offers one of the new solutions. It can be assumed that in the coming years, small spacecraft and low-orbit groups consisting of a large number of such vehicles will create and occupy a completely new niche in the market of satellite services with the possible gradual displacement of their larger counterparts. The conditions for this will arise naturally: economic feasibility, operational con-

venience, etc. At the same time, the feasibility of introducing a low-orbit supplement based on small spacecraft to the GLONASS system requires additional research.

Keywords: GLONASS, small spacecraft, low-orbit complement, orbital grouping, prerequisites, accuracy

For citation: Leonidov N.V., Mitina M.V. Image of low-orbital addition to orbital constellation Glonass system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2: 66–70. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-9

Введение

По состоянию на сегодняшний день система ГЛОНАСС требует модернизации по многим параметрам:

- половина орбитальных группировок (ОГ) находится за пределами гарантированного срока активного существования (САС);
- точность абсолютного режима навигации ниже, чем у глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) других стран;
- геометрические свойства ОГ (видимость, доступность, PDOP и др.) исчерпали свой потенциал;
- длительность передачи информации целостности (информирование потребителя о непригодности навигационного сигнала космического аппарата (КА) средствами космического комплекса) превышает требуемую ИКАО и др.

Анализ направлений развития зарубежных ГНСС выявил следующие тенденции:

- интеграция различных ГНСС;
- повышение точности абсолютного режима навигации;
- снижение длительности сходимости решения при холодном старте;
- взаимодействие с сервисами высокоточной навигации и корректирующими станциями (PPP, RTK, ABAS...);
- переход на сигналы с кодовым разделением;
- стремление к навигационной независимости, в том числе с поддержкой сугубо национальных интересов;
- повышение эластичности ГНСС (устойчивости к выходу из строя отдельных низкоорбитальных космических аппаратов (НКА));
- внедрение дополнительных функций в систему;
- построение дополнений к среднеорбитальной группировке.

Низкоорбитальное дополнение

В свете мировых тенденций развития ГНСС и технологий большой интерес представляет возможность построения низкоорбитальной группировки, которая станет дополнением к среднеорбитальной ОГ.

По мнению некоторых экспертов, для системы ГЛОНАСС следует рассматривать вариант построения, подобный китайскому. ГНСС BeiDou введена в штатную эксплуатацию глобально в 2020 г. [1]. Однако уже в 2019 г. Китай официально представил проект низкоорбитального дополнения Centispace к своей ГНСС [2]. Согласно представленным материалам, такое дополнение будет построено на базе 120 малых космических аппаратов (МКА), весом около 100 кг каждый, высота орбиты 975 км и наклонение 55° [2]. У Китая нет необходимости в создании навигационного поля в приполярных регионах, а выбранное наклонение позволяет затронуть ключевые региональные экономические интересы КНР.

Поскольку РФ открыто заявляет об интересах в Арктической зоне [3; 4], низкоорбитальное дополнение к ОГ ГЛОНАСС должно обеспечивать эти территории навигационным полем. Следовательно, требуются наклонения орбит, приближающиеся к 90° .

Из условия сохранения возможности использовать RAIM-алгоритмы на различных углах места было проведено моделирование с целью выяснения облика подобного дополнения. Результаты представлены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Показатели	Высота 1000 км			Высота 2000 км вар. 1			Высота 2000 км вар. 2		
	Угол видимости								
	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 25^\circ$
Видимость ГЛОНАСС + МНКА, КА	11	7	5	10	7	5	10	7	5
PDOP _{ср.}	1,317	2,084	3,371	1,444	2,217	3,393	1,430	2,170	3,365
$N_{\text{МКА}}$	161			63			60		
$N_{\text{ПЛ}}$	7			7			5		
i	90°								

Малые космические аппараты

Из данных табл. 1 видно, что количество НКА в низкоорбитальном дополнении должно быть большим – не менее 60 для высоты орбиты 2000 км и 161 для высоты 1000 км. При классическом способе производства и запуска КА такие количественные показатели недостижимы. Требуется совершенно иной подход к решению данного вопроса.

Для снижения стоимости производства данные аппараты должны выполняться в минимальном исполнении. Это могут быть специализированные аппараты, не несущие специальной и научно-исследовательской аппаратуры и выполняющие только задачи навигации, передачи сообщений и частотно-временных поправок. В совокупности со снижением орбиты потребуются меньшие мощности, массы и габариты относительно традиционных НКА ГЛОНАСС. Такая концепция сама подталкивает к идее разработки малых КА [6].

Малые КА при скромных массово-габаритных характеристиках могут запускаться легкими и средними ракетами-носителями большими группами, что позволит заполнять целую орбитальную плоскость за один пуск. Пополнение низкоорбитальной ОГ возможно с помощью малых РН и даже конверсионными ракетами [7].

Для аппаратов этого типа не потребуется высокий САС (предполагается на уровне 5 лет), что является отдельным свойством подобной группировки – возможность скоротечной модернизации, чего лишены крупные КА из-за своего высокого САС и длительности разработок. Это дает высокую степень гибкости в развитии всей системы. Так как требование по гарантированному САС снижено, возможно использование общедоступных компонентов для производства МКА. Такой подход позволяет нарастить фонд ЗИП на предприятии-производителе для оперативного устранения поломок. Все это позволит организовать поточное производство МКА, которое является необходимым условием для введения ОГ с высокой численностью в строй и своевременным ее поддержанием.

Опыт эскизного проектирования связанных малых аппаратов показывает возможность достижения массы 50 кг (проект Марафон). По оценкам экспертов, занимающихся проектированием космического сегмента ГЛОНАСС, аналогичный навигационный аппарат будет иметь массу около 100 кг и габариты, позволяющие производить групповые запуски в количестве до 11 НКА с помощью РН СОЮЗ-2.1в, Ангара-1.2 [8].

Предпосылки для проектирования малых космических аппаратов

Как ранее не было стремления к построению негерметичных КА, так на сегодняшний день отсутствует стремление к производству малых КА и ОГ с большой численностью. Однако для прогресса назрели многочисленные предпосылки:

- развитие компьютерного программного обеспечения, позволяющего производить различные виды моделирования;
- санкционные ограничения, которые вынуждают переходить на отечественную и общедоступную электронно-компонентную базу;
- стремительное развитие композиционных материалов, позволяющих производить легкие и прочные конструкции космических аппаратов, в том числе с нестандартной конфигурацией;
- сдача строительства монтажно-испытательного корпуса в АО «ИСС» в 2021 г., который позволит организовать поточную линию производства КА с коротким циклом сборки и испытаний [9; 10];
- поиск нестандартных решений по снижению конечной стоимости производства и эксплуатации системы ГЛОНАСС;
- развитие сегмента потребителей навигационных сигналов и, как следствие, рост количества услуг, предоставляемых глобальными спутниковыми навигационными системами, включая сервисы высокоточной навигации в реальном времени;
- введение в 2021 г. новой версии интерфейсного контрольного документа (ИКД), регламентирующего порядок применения НКА с кодовым разделением сигналов и позволяющего снять ограничение в 24 КА для орбитальной группировки;
- необходимость высоких темпов обновления системы и космического сегмента в частности.

Заклучение

В текущий момент малые КА являются новшеством. И хотя по многочисленным заявлениям и разработкам иностранных коллег [11–13] очевидно, что данные работы перспективны, неповоротливая бюрократическая машина в РФ может начать движение в их сторону слишком поздно, чтобы конкурировать с другими ГНСС.

Низкоорбитальное дополнение на основе МКА способно улучшить точность абсолютного позиционирования до дециметровой, снизить длительность информирования потребителя о целостности системы до 3 с, расширить применение сервисов высокоточной навигации, ускорить сходимость решения при холодном пуске, повысить гибкость космического сегмента, улучшить геометрические характеристики и устойчивость к попыткам выведения системы из строя.

Производство МКА даст практический опыт построения и эксплуатации таких аппаратов, который может лечь в основу многих других проектов, с постепенным уходом от традиционных методов построения спутниковых систем.

Список литературы

1. BeiDou Navigation Satellite System // Systems. URL: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (дата обращения: 01.02.2021)
2. Yang Long. A LEO Satellite-Based Augmentation System : презентация на 14-й встрече международного комитета по глобальным навигационным спутниковым системам. 10.12.2019. 26 с.
3. Чем занимаются в Арктике другие страны // Российская газета. URL: <https://rg.ru/2019/11/25/chem-zanimaiutsia-v-arktike-drugie-strany.html/> (дата обращения: 01.02.2021).
4. Российские владения в Арктике. История и проблемы международного-правового статуса // ТАСС. URL: <https://tass.ru/info/6312329/> (дата обращения: 01.02.2021).
5. Леонидов Н. В. Исследование и разработка перспективных направлений развития орбитальной группировки ГЛОНАСС с использованием новых сигналов CDMA : дис. магистра. СПб : БГТУ, 2020. 120 с.
6. Леонидов Н. В., Рукосуев Д. Л., Артемьев А. М. Мировые тенденции развития малых космических аппаратов // Студенческий вестник. 2020. № 21. URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/119> (дата обращения: 07.08.2020).
7. Леонидов Н. В. Концепция низкоорбитального навигационно-связного дополнения к системе ГЛОНАСС // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сб. ст. по материалам ХСII Междунар. студ. науч.-практ. конф. 2020. № 8 (91). URL: [https://sibac.info/archive/technic/8\(91\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/8(91).pdf) (дата обращения: 11.08.2020).
8. Ракеты-носители // Роскосмос. URL: <https://www.roscosmos.ru/33/> (дата обращения: 01.02.2021).
9. В «ИСС» введен в эксплуатацию новый корпус // АО «ИСС». URL: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-100918/> (дата обращения: 01.02.2021).
10. Новый комплекс для испытаний спутников // АО «ИСС». URL: <http://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-211019/> (дата обращения: 01.02.2021).
11. KEPLER 3rd generation Global Navigation Satellite System. URL: <https://www.kepler.global/conf/system/> (дата обращения: 02.02.2021).
12. BeiDou Navigation Satellite System. URL: <http://en.beidou.gov.cn/> (дата обращения: 02.02.2021).
13. CubeSat finds its way in space with Galileo receiver // GPS WORLD. URL: <https://www.gpsworld.com/cubesat-finds-its-way-in-space-with-galileo-receiver/> (дата обращения 02.02.2021).

References

1. BeiDou Navigation Satellite System. *Systems*. Available at: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (accessed 01.02.2021)
2. Yang Long. *A LEO Satellite-Based Augmentation System: prezentatsiya na 14-y vstreche mezhdunarodnogo komiteta po global'nyim navigatsionnym sputnikovym sistemam = A LEO Satellite-Based Augmentation System: presentation at the 14th meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems*. 2019:26.
3. What are other countries doing in the Arctic. *Rossiyskaya gazeta = Rossiyskaya Gazeta*. (In Russ.). Available at: <https://rg.ru/2019/11/25/chem-zanimaiutsia-v-arktike-drugie-strany.html/> (accessed 01.02.2021).
4. *Rossiyskie vladeniya v Arktike. Istoriya i problemy mezhdunarodno-pravovogo statusa = Russian possessions in the Arctic. History and problems of the international legal status*. (In Russ.). TASS. Available at: <https://tass.ru/info/6312329/> (accessed 01.02.2021).
5. Leonidov N.V. *Issledovanie i razrabotka perspektivnykh napravleniy razvitiya orbital'noy gruppировки GLONASS s ispol'zovaniem novykh signalov CDMA: dis. magistra = Research and development of prom-*

- ising directions for the development of the GLONASS orbital constellation using new CDMA signals: dis. master's degree.* Saint-Petersburg: BGTU, 2020:120. (In Russ.)
6. Leonidov N.V., Rukosuev D.L., Artem'ev A.M. Global trends in the development of small spacecraft. *Studencheskiy vestnik = Student Bulletin.* 2020;21. (In Russ.). Available at: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/119> (accessed 07.08.2020).
 7. Leonidov N.V. The concept of a low-orbit navigation-connected supplement to the GLONASS system. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki: sb. st. po materialam XCII Mezhdunar. stud. nauch.-prakt. konf. = Scientific community of students of the XXI century. Technical sciences: collection of articles based on the materials of the XCII International Student Scientific and Practical Conference.* 2020;8(91). (In Russ.). Available at: [https://sibac.info/archive/technic/8\(91\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/8(91).pdf) (accessed 11.08.2020).
 8. Launch vehicles. *Roskosmos.* (In Russ.). Available at: <https://www.roscosmos.ru/33/> (accessed 01.02.2021).
 9. *V «ISS» vveden v ekspluatatsiyu novyy korpus = A new building has been put into operation at ISS. AO «ISS».* (In Russ.). Available at: <https://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-100918/> (accessed 01.02.2021).
 10. *Novyy kompleks dlya ispytaniy sputnikov = A new complex for testing satellites. AO «ISS».* (In Russ.). Available at: <http://www.iss-reshetnev.ru/media/news/news-211019/> (accessed 01.02.2021).
 11. *KEPLER 3rd generation Global Navigation Satellite System.* Available at: <https://www.kepler.global/conf/system/> (accessed 02.02.2021).
 12. *BeiDou Navigation Satellite System.* Available at: <http://en.beidou.gov.cn/> (accessed 02.02.2021).
 13. CubeSat finds its way in space with Galileo receiver. *GPS WORLD.* Available at: <https://www.gpsworld.com/cubesat-finds-its-way-in-space-with-galileo-receiver/> (accessed 02.02.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Владимирович Леонидов

инженер,
АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева»
(Россия, Красноярский край, г. Железногорск);
аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
(Россия, г. Красноярск, проспект имени Газеты
Красноярский Рабочий, 31)
E-mail: nleonidov_isi@inbox.ru

Nikolay V. Leonidov

Engineer,
JSC "Information Satellite Systems"
named after academician M. F. Reshetnev
(Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia);
Postgraduate student,
Siberian State University of Science
and Technology named after
academician M. F. Reshetnev
(31 imeni Gazety Krasnoyarskiy Rabochiy avenue,
Krasnoyarsk, Russia)

Мария Витальевна Митина

инженер,
АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева»
(Россия, Красноярский край, г. Железногорск);
аспирант,
Сибирский государственный университет науки
и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
(Россия, г. Красноярск, проспект имени Газеты
Красноярский Рабочий, 31)
E-mail: nleonidov_isi@inbox.ru

Mariya V. Mitina

Engineer,
JSC "Information Satellite Systems"
named after academician M. F. Reshetnev
(Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia);
Postgraduate student,
Siberian State University of Science
and Technology named after
academician M. F. Reshetnev
(31 imeni Gazety Krasnoyarskiy Rabochiy avenue,
Krasnoyarsk, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования / Revised 05.04.2021

Принята к публикации / Accepted 15.04.2021

УДК 531.741

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. А. Трофимов¹, А. В. Гладков², Н. С. Трофимова³, С. А. Здобнов⁴, Д. Н. Колтин⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1,3,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Необходимость получения информации о физических процессах, технических характеристиках систем и агрегатов авиационных двигателей, сведений о функционировании и взаимодействии комплектующих систем, обеспечение оптимального режима работы двигателя требуют создания специальных датчиков для изделий авиационной техники. Роль датчиков является определяющей в любой измерительной системе. От их характеристик все в большей мере зависит надежность и эффективность различных видов авиационной техники. Технические характеристики датчиков в значительной степени влияют на технический уровень самих средств контроля и диагностирования, в частности, создание датчиков для измерения угловых перемещений, способных обеспечить оптимальный режим работы авиационного двигателя. Поэтому развитие и совершенствование парка современных датчиков можно выделить как одно из важнейших направлений повышения эффективности изделий авиационной техники. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, аналитической геометрии, теории электрических цепей и электромагнитного поля. При проектировании конструкций датчиков применялись системы автоматизированного проектирования КОМПАС и AutoCAD. *Результаты.* В результате проведенной работы разработан датчик угловых перемещений с встроенным электронным преобразователем, разработанным на основе микросхемы фирмы Analog Device, предназначенной для работы с дифференциальными трансформаторными датчиками перемещений, удовлетворяющий предъявляемым к нему требованиям по точности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам и может использоваться для измерения угловых перемещений направляющих аппаратов компрессора авиационного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, датчик перемещений, статор, ротор, электронный преобразователь, обмотка

Для цитирования: Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С., Здобнов С. А., Колтин Д. Н. Датчик угловых перемещений для газотурбинного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 71–76. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR FOR GAS TURBINE ENGINE

A.A. Trofimov¹, A.V. Gladkov², N.S. Trofimova³, S.A. Zdobnov⁴, D.N. Koltin⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

^{1,3,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* The need to obtain information on the physical processes, technical characteristics of systems and assemblies of aircraft engines, information on the functioning and interaction of component systems, ensuring the optimal operation of the engine requires the creation of special sensors for aircraft products. The role of sensors is decisive in any measuring system. The reliability and efficiency of various types of aviation technology increasingly depend on their characteristics. The technical characteristics of the sensors greatly affect the technical level of the control and diagnostic tools themselves. In particular, the creation of sensors for measuring angular displacements capable of providing an optimal operating mode of an aircraft engine. Therefore, the development and improvement of the fleet of modern sensors can be singled out as one of the most important areas of increasing the efficiency of aircraft products. *Materials and methods.* The methods of integral and differential calculus, analytical geometry, the theory of electrical circuits and the electromagnetic field were used for solving the set tasks. KOMPAS and AutoCAD computer-aided design systems were used for designing the sensor structures. *Results.* As a result of the work carried out, an angular displacement sensor with a built-in electronic transducer on the basis of an Analog Device microcircuit, designed to work with differential transformer displacement sensors, was developed. The sensor meets the requirements for accuracy, reliability and resistance to external influences and can be used to measure the angular displacements of the guide vanes of an aircraft gas turbine engine compressor.

Keywords: gas turbine engine, displacement sensor, stator, rotor, electronic converter, winding

For citation: Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S., Zdobnov S.A., Koltin D.N. Angular displacement sensor for gas turbine engine. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2:71–76. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

Введение

Одной из важнейших проблем при эксплуатации газотурбинных двигателей является обеспечение оптимального режима работы двигателя, т.е. обеспечение максимальной мощности при минимальном расходе горючего. Выбор такого оптимального режима зависит от углового положения лопаток направляющих аппаратов компрессора (НАК), контроль которого осуществляется с помощью датчиков угловых перемещений. Очевидно, что именно характеристики датчиков во многом определяют точность позиционирования лопаток и в конечном итоге обеспечение оптимального режима двигателя [1–5].

К датчикам угловых перемещений предъявляются жесткие требования:

- по метрологии (основная погрешность – не более 0,1 %);
- по внешним воздействующим факторам (работоспособность в диапазоне температур от минус 60 до 100 °С при воздействии сильных электромагнитных помех, вибраций, акустических шумов);
- по ресурсу (до 15 000 ч);
- по габаритам и массе (объем – не более 50 см³).

Основная часть

В настоящее время для контроля углового положения лопаток НАК используются сельсины и потенциометрические датчики. И те, и другие обладают рядом недостатков, которые затрудняют их применение для перспективных двигателей. Так, например, сельсины имеют два периодических (синусный и косинусный) выходных сигнала, для обработки которых необходимы довольно громоздкие электрические схемы. Кроме того, в случае исчезновения питания в процессе поворота лопаток невозможно проконтролировать их новое положение при восстановлении питания. Потенциометрические датчики вследствие наличия скользящего электрического контакта имеют ограниченный ресурс и низкую виброустойчивость, кроме того, и те, и другие датчики не соответствуют требованиям по точности, а сельсины – и по габаритно-массовым характеристикам. Поэтому разработка датчика угловых перемещений лопаток НАК, соответствующего предъявляемым требованиям для перспективных двигателей, является актуальной задачей. Разработан датчик, который, по нашему мнению, может обеспечить выполнение этих требований. Общий вид датчика представлен на рис. 1.

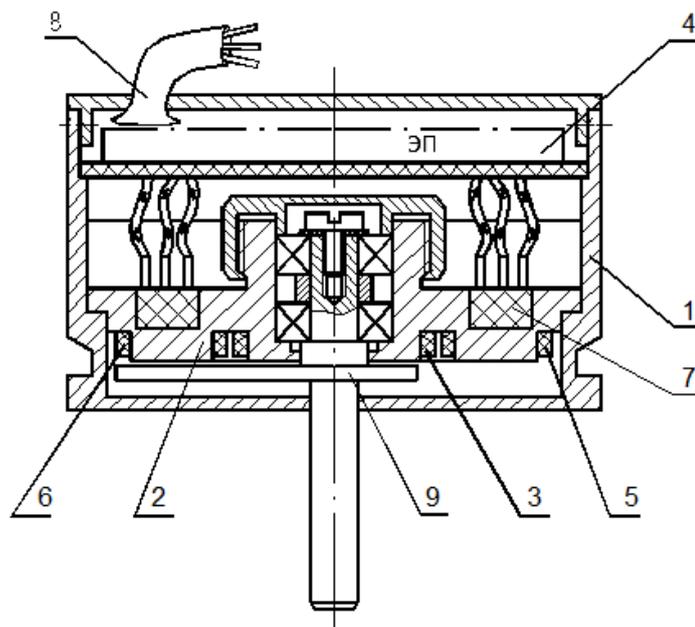


Рис. 1. Общий вид датчика перемещения

Он состоит из корпуса 1, статора 2, обмотки питания 3, секций 5 и 6 измерительной обмотки, контактной колодки 7, электронного преобразователя 4, кабельной перемычки 8, якоря (ротора) 9. Корпус датчика изготовлен из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, статор из пермаллоя 79НМ. Кабельная перемычка выполнена из кабеля КТМС с оболочкой из нержавеющей стали. Якорь датчика выполнен из пермаллоя 79НМ.

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. В нем измерительные обмотки располагаются вокруг двух полюсов статора, имеющих форму секторов с углом 180° , и соединены последовательно встречно (рис. 2).

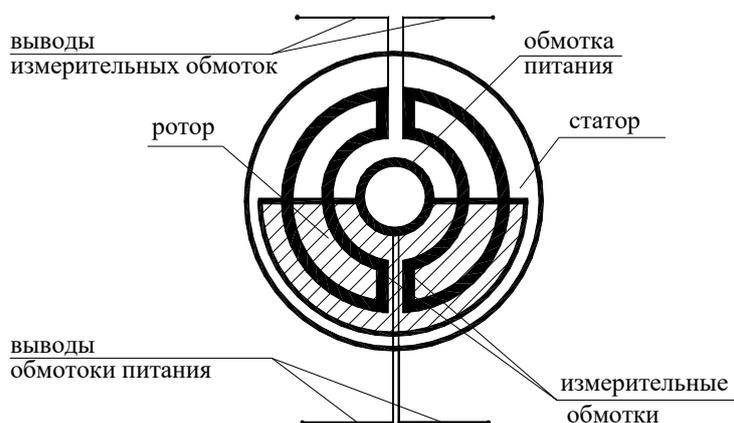


Рис. 2. Положение якоря при нулевом выходном сигнале

Датчик работает следующим образом: при подаче на обмотку питания переменного тока в секциях измерительной обмотки индуцируется переменная ЭДС (E), амплитуда которой зависит от положения якоря относительно полюсов статора и в соответствии с работой [6] будет равна

$$E = \omega I_1 \frac{W_1 W_2}{\sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{\delta}{\mu_0 S} + \frac{P_{cm}}{\omega \Phi^2}},$$

где ω – круговая частота тока питания; I_1 – амплитуда тока питания; $W_1 W_2$ – количество витков питающей и измерительной обмотки; μ_i – магнитная проницаемость i участка магнитопровода; l_i – длина i участка магнитопровода; S_i – площадь поперечного сечения i участка магнитопровода; μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора; S – площадь поперечного сечения воздушного зазора; P_{cm} – мощность потерь на гистерезис и вихревые токи; Φ – действующее значение магнитного потока.

Следует отметить, что теория расчета взаимноиндуктивных (трансформаторных) датчиков с переменным магнитным сопротивлением достаточно полно разработана и изложена в работах [6, 7]. Поэтому их расчет не представляет особых затруднений.

Главной проблемой датчика является обеспечение основной погрешности не более 0,1 %, учитывая, что реальные характеристики такого типа датчиков имеют S-образную форму (рис. 3).

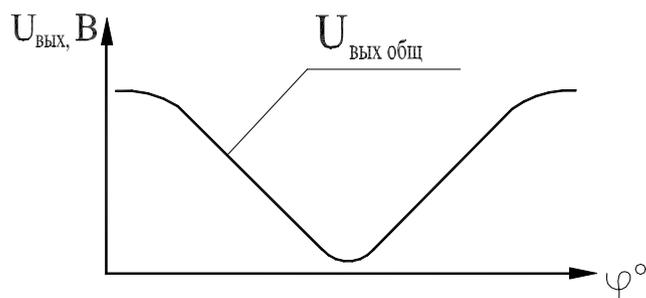


Рис. 3. Форма выходной градуировочной характеристики с датчика угловых перемещений

Исключение этой нелинейности производится с помощью электронного преобразователя, в котором применена специальная микросхема фирмы Analog Device, предназначенная для работы с дифференциальными трансформаторными датчиками перемещений.

Принцип работы электронного преобразователя (ЭП) объясняется с помощью функциональной схемы (рис. 4), состоящей из чувствительного элемента (ЧЭ), генератора (Г), усилителя мощности (УМ), входных усилителей (ВхУ1, ВхУ2), детектора (Д), фильтра (Ф), выходного усилителя (Вых У), преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ).

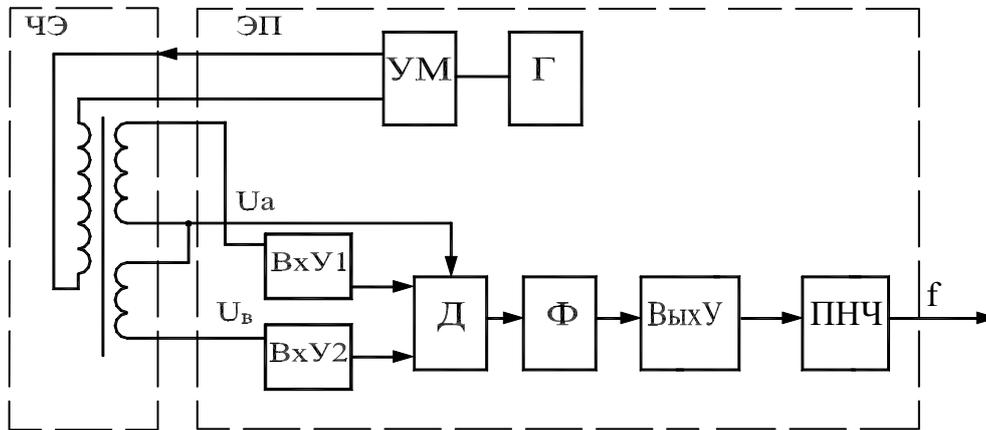


Рис. 4. Структурная схема датчика

При подаче напряжения питания на датчик запускается генератор, входящий в состав электронного преобразователя, который формирует синусоидальный сигнал с частотой 10 кГц. Этот сигнал через усилитель мощности передается на обмотку питания ЧЭ, индуцируется электромагнитное поле, которое возбуждает ток в каждой секции измерительной обмотки ЧЭ, значение которого зависит от площади обмотки, перекрытой якорем в момент измерения.

При вращении якоря соотношения перекрываемых площадей секций измерительной обмотки изменяются, что приводит к изменению выходного сигнала.

Выходные сигналы U_A и U_B с измерительных обмоток через входной усилитель, который осуществляет увеличение амплитуды сигналов с измерительной обмотки, поступают на детектор. Детектор осуществляет операцию деления разности сигналов секций измерительной обмотки на их сумму и умножение на масштабирующий коэффициент

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_A - U_B}{U_A + U_B} \cdot 500 \mu\text{A} \cdot R_2.$$

Далее полученный сигнал фильтруется и через выходной усилитель поступает на преобразователь напряжения в частоту (ПНЧ), а затем в систему автоматического управления. Изменение амплитуды выходного сигнала датчика в зависимости от угла поворота якоря носит линейный характер (рис. 5).

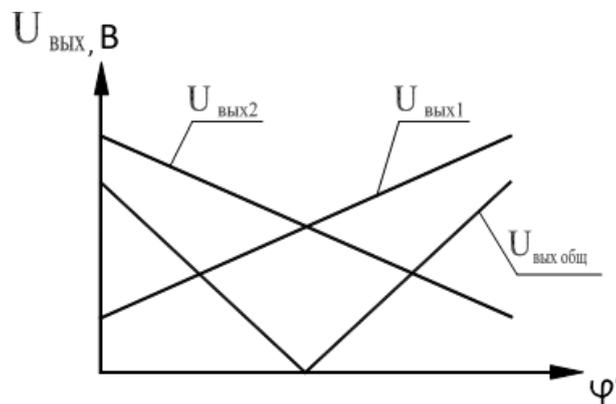


Рис. 5. Вид выходных характеристик датчика угловых перемещений

Заклучение

Таким образом, рассмотренный датчик угловых перемещений с встроенным электронным преобразователем полностью удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям и может использоваться для измерения угловых перемещений направляющих аппаратов компрессора.

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. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
4. Трофимов А. А. Датчик угловых перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 13–14.
5. Баринов Н. И., Трофимов А. А. Датчики углового положения для внутритрубного профилемера // Датчики и системы. 2004. № 2. С. 37–39.
6. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Л. : Энергия, 1977.
7. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and, based on them, measurement, monitoring and control systems for 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 designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;10:18–21. (In Russ.)
3. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;9:8–10. (In Russ.)
4. Trofimov A.A. Angular displacement sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;9:13–14. (In Russ.)
5. Barinov N.I., Trofimov A.A. Angular position sensors for in-line profiler. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2004;2:37–39. (In Russ.)
6. Turichin A.M. *Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin = Electrical measurements of non-electrical quantities*. Leningrad: Energiya, 1977. (In Russ.)
7. Urakseev M.A., Kagarmenov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;1:33–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**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

Alexei A. Trofimov

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

Алексей Владимирович Гладков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

Alexei V. Gladkov

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

Наталья Сергеевна Трофимова

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Natalya S. Trofimova

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Здобнов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zdobnov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Данила Николаевич Колтин

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Danila N. Koltin

Master degree 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 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021