

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Козырев Г. И., Юдицких Е. О.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
НА ОСНОВЕ ВВЕДЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ
СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

5

Горшенин П. Е., Горшенина Т. В., Попченков Д. В.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ СТЕНДА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

14

Чикрин Д. Е., Смольникова К. Р., Галиуллин И. Г.

СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ

20

Ежижанский В. Д., Бояркин Д. С., Голушко Д. А.,

Абузьяров И. Р., Лысенко А. В.

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМОЙ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ
ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

28

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Александров В. Р., Щеткин А. А., Бевз А. С.

ГЕНЕРАТИВНЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
В ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА

34

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Бобылев Ф. А., Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М.

ИМПУЛЬСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ
ВРЕМЕНИ ПЕРЕЗАРЯДА МДП-СТРУКТУРЫ

46

Ануар Г. А., Трофимов А. А., Рыбаков И. М., Бростилов С. А.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ
ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ

53

Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянин Н. С., Цытин Б. В.
СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

59

*Максов А. А., Печерская Е. А., Голубков П. Е.,
Мельников О. А., Чувькин Б. В., Потешкин С. А.*
ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ
ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

70

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Самофалов Д. А., Дегтерев Д. А., Печенина Д. Н.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В СОЧЕТАНИИ
С ИНТЕРФЕЙСОМ «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» В ДВИГАТЕЛЬНОЙ
РЕАБИЛИТАЦИИ

79

Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Агейкин А. В.
РАЗРАБОТКА ПЕРЧАТКИ-КОНТРОЛЛЕРА С БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА

90

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Kozyrev G.I., Yuditskikh E.O.

A MODEL OF THE PROCESS OF CURRENT IDENTIFICATION
OF DYNAMIC MEANS OF TELE-MEASUREMENT AND RESTORATION
OF TELEMETERED PARAMETERS BASED ON THE INTRODUCTION
OF MINIMAL STRUCTURAL REDUNDANCY

5

Gorshenin P.E., Gorshenina T.V., Popchenkov D.V.

IMPROVEMENT OF HIGH PRESSURE BENCH SYSTEMS

14

Chikrin D.E., Smolnikova K.R., Galiullin I.G.

SAFETY STANDARDS FOR COLLABORATIVE ROBOTS

20

Yezhizhanskiy V.D., Boyarkin D.S., Golushko D.A., Abuzyarov I.R., Lysenko A.V.

THE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE INFORMATION
AND MEASURING LIFE SUPPORT SYSTEM OF AN AUTOMOTIVE
GAS FILLING COMPRESSOR STATION

28

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Aleksandrov V.R., Shchetkin A.A., Bevz A.S.

GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE
IN MANUFACTURING PLANNING

34

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Bobylev F.A., Tashlintsev D.A., Chaykovskiy V.M.

PULSE METER ON THE MICROCONTROLLER
OF THE RECHARGE TIME OF THE TIR STRUCTURE

46

Anuar G.A., Trofimov A.A., Rybakov I.M., Brostilov S.A.

DETERMINATION AMPLITUDE RESONANT FREQUENCIES
TEMPERATURE SENSOR UNDER ACTION OF SINUSOIDAL VIBRATION

53

Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsypin B.V.

THE STATE AND DEVELOPMENT TRENDS
OF EDDY CURRENT SENSORS

59

Maksov A.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E.,

Melnikov O.A., Chuvykin B.V., Poteshkin S.A.

REQUIREMENTS FOR THE PARAMETERS OF MICROARC OXIDE
COATINGS DEPENDING ON THEIR FIELD OF APPLICATION

70

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Samofalov D.A., Degterev D.A., Pechenina D.N.

THE USE OF VIRTUAL REALITY IN COMBINATION
WITH A BRAIN-COMPUTER INTERFACE IN MOTOR REHABILITATION

79

Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Ageikin A.V.

DEVELOPMENT OF A GLOVE CONTROLLER WITH BIOFEEDBACK
OF VIRTUAL REALITY BASED ON AN ELECTROPNEUMATIC DRIVE

90

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ВВЕДЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Г. И. Козырев¹, Е. О. Юдицких²

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

¹gen-kozyrev@yandex.ru, ²eug-89@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности телеизмерений (ТИ) изделий ракетно-космической техники в сложных условиях помеховой обстановки, в том числе при воздействии различного рода дестабилизирующих факторов, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала. Целью работы является разработка модели процесса текущей (в процессе эксплуатации) идентификации динамических средств телеизмерений (СрТИ) и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности при малой априорной информации относительно статистических характеристик полезного сигнала и помех. *Материалы и методы.* Проведен анализ причин, влияющих на погрешность ТИ в месте эксплуатации объекта измерений. Дано подробное описание двух основных составляющих суммарной погрешности ТИ: погрешности идентификации, обусловленной отличием реального оператора СрТИ от его номинального значения вследствие воздействия на параметры реального оператора совокупности неопределенных дестабилизирующих факторов, и погрешности восстановления входного сигнала СрТИ для динамического режима измерений. Предложена модель процесса текущей идентификации динамических СрТИ и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения дополнительного измерительного канала и квазиоптимального регуляризирующего оператора, входящего в состав обратного фильтра оператора восстановления. *Результаты и выводы.* Результаты исследований могут быть использованы для повышения точности измерительных систем в динамическом режиме измерений, в том числе в условиях воздействия ДФ, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала, а также для метрологического самоконтроля в интеллектуальных измерительных системах.

Ключевые слова: средство телеизмерений, дестабилизирующие факторы, идентификация, структурная избыточность, восстановление, некорректность, регуляризация

Для цитирования: Козырев Г. И., Юдицких Е. О. Модель процесса текущей идентификации динамических средств телеизмерений и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 5–13. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

A MODEL OF THE PROCESS OF CURRENT IDENTIFICATION OF DYNAMIC MEANS OF TELE-MEASUREMENT AND RESTORATION OF TELEMETERED PARAMETERS BASED ON THE INTRODUCTION OF MINIMAL STRUCTURAL REDUNDANCY

G.I. Kozyrev¹, E.O. Yuditskikh²

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

¹gen-kozyrev@yandex.ru, ²eug-89@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this work is due to the need to improve the accuracy of tele-measurements of rocket and space technology products in difficult interference conditions, including under the influence of various kinds of destabilizing factors (CF), the frequency spectrum lies in the spectrum of the useful signal. The aim of the work is to develop a model of the process of current (in-service) identification of dynamic means of tele-measurement (DTI) and restoration of telemetered parameters (TMP) based on the introduction of minimal structural redundancy with little a priori information regarding the statistical characteristics of the useful signal and interference. *Materials and methods.* The analysis of the reasons affecting the accuracy of the TUE at the place of operation of the measuring object is carried out. A detailed description is given of the two main components of the total TUE error: the identification error caused by the difference between the real TUE operator and its nominal value due to the effect on the parameters of the real operator of a set of uncertain DFS, and the error in restoring the TUE input signal for the dynamic measurement mode. A model of the process of the current identification of dynamic SRT and recovery of TMP is proposed based on the introduction of an additional measuring channel and a quasi-optimal regularizing operator, which is part of the reverse filter of the recovery operator. *Results and conclusions.* The research results can be used to improve the accuracy of measuring systems in the dynamic measurement mode, including under conditions of exposure to RF, the frequency spectrum lies in the spectrum of the useful signal, as well as for metrological self-monitoring in intelligent measuring systems.

Keywords: means of tele-measurement, destabilizing factors, identification, structural redundancy, restoration, incorrectness, regularization

For citation: Kozyrev G.I., Yuditskikh E.O. A model of the process of current identification of dynamic means of tele-measurement and restoration of telemetered parameters based on the introduction of minimal structural redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-1

Введение

Операции телеконтроля являются составной частью технологических процессов обслуживания, запуска и управления в полете подвижных изделий ракетно-космической техники (РКТ). Результаты телеизмерений (ТИ) в значительной степени определяют достоверность получаемой информации об условиях применения и состояния космических средств и, следовательно, адекватность принимаемых решений реальному состоянию условий и техники [1]. Отклонение параметров измерительного тракта от их номинальных значений объясняется влиянием различного рода помех и дестабилизирующих факторов (ДФ), которые в наибольшей степени воздействуют на первичные элементы системы ТИ – датчико-преобразующую аппаратуру (ДПА). Так как конкретные значения ДФ в процессе проведения ТИ являются неизвестными (неконтролируемыми), то при отсутствии информации относительно законов их распределения подобные факторы относятся к разряду неопределенных [2]. Влияние ДФ приводит со временем к появлению скрытых (метрологических) отказов, проявляющихся в постепенном ухудшении точностных характеристик ДПА, выходящих в ряде случаев за пределы допустимых значений. Это, в свою очередь, влечет за собой получение неправильных результатов измерений и, в зависимости от места применения ДПА, может привести к непредсказуемым последствиям. Целью данной статьи является проведение анализа причин, влияющих на суммарную погрешность средств ТИ в месте эксплуатации объекта измерений – бортовой системы изделия РКТ, рассмотрение основных направлений уменьшения отдельных составляющих суммарной погрешности ТИ и разработка модели процесса проведения высокоточных ТИ с учетом воздействия различного рода помех и неопределенных ДФ.

Предварительные замечания

Рассмотрим задачу измерений значений изменяющегося во времени телеметрируемого параметра $x(t)$ на входе средства телеизмерений (СрТИ). Процедура получения результата ТИ предполагает проведение двух основных последовательных преобразований [3]: прямого $F : x(t) \rightarrow y(t)$, в ходе которого система F отображает входной сигнал $x(t)$, обычно неэлектрического типа, в промежуточный результат $y(t)$, и обратного $G : y(t) \rightarrow \hat{x}(t)$, называемого восстановлением входного сигнала.

Преобразование F носит физический характер, G , как правило, чисто вычислительный, поскольку оно связано с обработкой промежуточного результата $y(t)$.

Задачей системы обработки (СО) результатов ТИ является получение результата $\hat{x}(t)$, близкого в некотором смысле к входному сигналу $x(t)$, что подразумевает знание операторов F и (или) G .

Достижению абсолютного тождества $x(t)$ и $\hat{x}(t)$ препятствуют погрешности ТИ, суммарная величина которых обусловлена несколькими причинами (рис. 1):

1) взаимодействием чувствительного элемента СрТИ с объектом измерений (ОИ), в качестве которого выступает бортовая система (БС) изделия РКТ. Вследствие указанного взаимодействия действительный выходной сигнал ОИ (номинальный входной сигнал СрТИ x_n) отличается от истинного x_n . На вход СрТИ, кроме сигнала x_n , воздействуют помехи $v(t)$, вызванные неинформативными параметрами входного сигнала $x(t)$, а также мешающими воздействиями, однородными с измеряемой величиной, например, вибрацией для линейных акселерометров, близлежащими металлическими предметами для измерителей напряженности магнитного поля Земли и т.д. Влияние СрТИ на измеряемую величину можно свести к нулю, применяя бесконтактные методы измерения. В дальнейшем будем считать, что погрешностью за счет взаимодействия СрТИ с ОИ можно пренебречь или ее можно учесть с помощью введения поправки в результаты ТИ;

2) отклонением оператора конкретного экземпляра СрТИ от типового, которое может рассматриваться как случайное по множеству СрТИ данного типа. Градуировка СрТИ для изделий РКТ обычно носит строго индивидуальный характер, поэтому указанной погрешностью также можно пренебречь;

3) отличием реального оператора СрТИ F_p от его номинальной величины F_n вследствие воздействия различного рода дестабилизирующих факторов (ДФ) $\xi(t)$ (температуры, влажности, давления, ионизации и т.д.), которые в силу специфики ТИ, проводимых на борту изделий РКТ, наиболее сильно влияют на ДПА. Влияние ДФ на оператор F особенно проявляется в аварийных условиях работы СрТИ, когда реальные параметры внешней среды существенно отличаются от предусмотренных техническими условиями. Влияние ДФ $\xi(t)$ на оператор F содержит детерминированную и случайную составляющие, поэтому вариация F и обусловленная ею погрешность будут иметь такие же составляющие. Однако, учитывая, что основная доля энергии ДФ в процессе ТИ лежит в полосе частот полезного сигнала $x(t)$, будем считать, что влияние $\xi(t)$ на прямой оператор СрТИ F носит систематический характер, а случайная составляющая данной погрешности пересчитывается на выход ИС и учитывается вместе с выходным шумом измерений $\mu(t)$;

4) разницей между зарегистрированным в системе обработки реальным выходным сигналом СрТИ y_p и его точным значением y_n из-за влияния выходного шума измерений $\mu(t)$. Погрешность $\mu(t)$ является аддитивной по отношению к сигналу $y_n(t)$ и обычно описывается случайной функцией с нулевым средним, распределенной по нормальному или равномерному закону. При обработке выходных сигналов динамических СрТИ величина $\mu(t)$ играет существенную роль в процессе реализации процедур идентификации и особенно при восстановлении входных сигналов из-за некорректности указанных задач;

5) отклонением реального оператора G_p от номинального G_n из-за погрешности вычислений. При принятии специальных мер (алгоритмов с двойной точностью, расширенной масштабной сеткой и т.п.), указанной погрешностью в дальнейшем можно пренебречь.

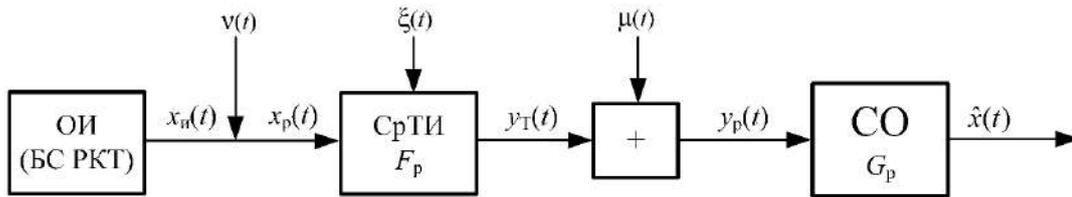


Рис. 1. Процесс получения результата телеизмерений

Разработка модели процесса текущей идентификации динамических средств телеизмерений и восстановления телеметрируемых параметров

Остановимся более подробно на третьей и четвертой составляющих суммарной погрешности ТИ: погрешности идентификации, обусловленной отличием реального оператора F_p СрТИ от его номинального значения F_n вследствие воздействия на параметры оператора F_p совокупности неопределенных ДФ $\xi(t)$, и погрешности восстановления входного сигнала СрТИ для динамического режима измерений.

Очевидно, что снизить погрешность идентификации СрТИ можно двумя способами [4]. Первый состоит в том, чтобы принять все возможные меры по стабилизации оператора F , его независимости от внешней среды (термостатирование, экранирование и т.п.). Второй способ заключается в определении реального вида оператора F при воздействии ДФ $\xi(t)$, а затем – соответствующей коррекции результатов ТИ с учетом созданных для этого условий, например, введением структурной избыточности в измерительный тракт. Зачастую перечень ДФ в процессе эксплуатации СрТИ не всегда бывает известным. В этом случае возникает задача текущей (в процессе эксплуатации) идентификации параметров СрТИ при неизвестной совокупности ДФ, включая и полезный входной сигнал, т.е. при неизвестных входных воздействиях. Следует также отметить, что для большинства измерительных задач вычисление текущих параметров СрТИ должно производиться без использования предпосылок о стационарности входного и выходного сигналов этих измерителей (как случайных процессов) и, следовательно, без предварительного оценивания корреляционных и взаимных корреляционных функций этих сигналов с целью последующего их использования в задачах идентификации. Подход, использующий такое оценивание, в процедурах текущей идентификации параметров СрТИ невозможен даже формально из-за неизвестности входного сигнала $x(t)$. Таким образом, задача текущей идентификации параметров СрТИ применительно к практике большинства измерительных задач должна формулироваться как задача оценивания оператора СрТИ (его структуры и параметров) по результатам измерений только выходного(ых) сигнала(ов) СрТИ.

Согласно принципу многоканальности Б. Н. Петрова [5], решение подобной задачи при воздействии на оператор ИС совокупности ДФ, спектр которых лежит в спектре полезного сигнала, невозможно без введения структурной избыточности во временной или пространственной области. С практической точки зрения очень важным является исследование возможностей текущей идентификации структурно-избыточных СрТИ (СИСрТИ) при неизвестных входных воздействиях в условиях минимальной избыточности, т.е. в условиях создания всего лишь одного дополнительного измерительного канала (рис. 2).

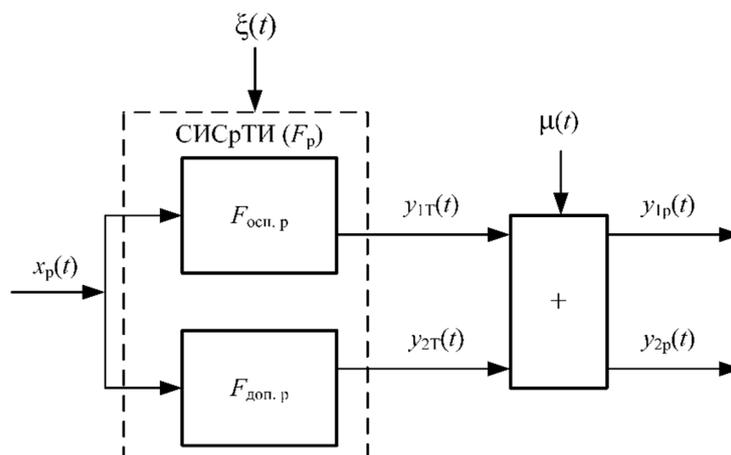


Рис. 2. Средство телеизмерений с минимальной избыточностью

Наличие дополнительных каналов в СрТИ для компенсации ДФ позволяет подойти к их синтезу и анализу с позиций теории инвариантности, развитой применительно к системам автоматического управления и регулирования [6].

Для текущей (пассивной) идентификации параметров СИСрТИ при неизвестном входном сигнале $x(t)$ необходимое условие для достижения абсолютной инвариантности СИСрТИ относительно неизвестной совокупности ДФ $\xi(t)$ заключается в некоммутативности операторов основного $F_{осн}$ и дополнительного $F_{доп}$ каналов минимально-избыточной (с одним дополнительным измерительным каналом) СрТИ [7]:

$$(F_{осн}F_{доп} - F_{доп}F_{осн})x(t) \neq 0. \quad (1)$$

Как показано в работе [7], для выполнения условия (1) при линейном операторе $F_{осн}$ необходимо, чтобы оператор $F_{доп}$ был нелинейным или нестационарным.

Выражение (1) является необходимым условием для достижения абсолютной инвариантности СИСрТИ относительно неизвестной совокупности ДФ. Достаточное же условие связано с физической реализуемостью дополнительного измерительного канала $F_{доп}$ СИСрТИ. Для статических СрТИ подобные требования заключаются в возможности реализации того или иного функционального (алгебраического) преобразования над входным воздействием. Для динамических СрТИ, описываемых с помощью дробно-рациональных передаточных функций, физическая реализуемость приводит к тому, что число нулей числителя дроби не должно превышать числа полюсов ее знаменателя.

Согласно рис. 2 параметры операторов $F_{осн.р}$ и $F_{доп.р}$ подвержены влиянию неопределенных ДФ $\xi(t)$. Задача текущей идентификации СрТИ состоит в том, чтобы при неизвестном входном сигнале $x(t)$ произвести оценку параметров оператора $F_{осн.р}$, а также, при необходимости, и оператора $F_{доп.р}$ с учетом того, что параметры обоих операторов являются нестабильными.

Воздействие одного и того же входного сигнала $x(t)$ на основной и дополнительный каналы СИСрТИ приводит к тому, что его выходные сигналы $y_{1р}(t)$ и $y_{2р}(t)$ являются связанными между собой. Это позволяет представить СИСрТИ (рис. 2) в виде эквивалентной динамической системы с оператором $F = F_{доп.р}F_{осн.р}^{-1}$, наблюдаемым «входным» $y_{1р}(t)$ и «выходным» $y_{2р}(t)$ сигналами и свести задачу текущей оценки нестабильных параметров СИСрТИ при неизвестном входном сигнале к стандартной задаче идентификации:

$$y_{2р}(t) = F_{доп.р}x(t) = F_{доп.р}F_{осн.р}^{-1}y_{1р}(t) = Fy_{1р}(t). \quad (2)$$

Обработка выходных сигналов $y_{1р}(t)$ и $y_{2р}(t)$ СИСрТИ при оценке нестабильных параметров СИСрТИ для операторов $F_{осн.р}$, $F_{осн.р}^{-1}$, $F_{доп.р}$ осуществляется в системе текущей идентификации, которая является составным элементом системы обработки.

Например, представим оператор основного измерительного канала $F_{осн.р}$ в виде линейной динамической системы 1-го порядка:

$$b(\xi)\dot{y}_{1р}(t) + y_{1р}(t) = x(t), \quad (3)$$

где $\dot{y}_{1р}(t)$ – первая производная сигнала $y_{1р}(t)$ по времени t .

Здесь текущий параметр $b(\xi)$ зависит от совокупности ДФ $\xi(t)$, т.е. является нестабильным. Параметр $b(\xi)$ можно выразить через его номинальное значение $b_{ном}$:

$$b(\xi) = b_{ном} + \Delta b(\xi),$$

где $\Delta b(\xi)$ характеризует отклонение параметра $b(\xi)$ от его номинального значения или нестабильность данного параметра.

Модель дополнительного канала СИСрТИ с учетом нелинейного преобразования L входного сигнала $x(t)$ имеет вид

$$b(\xi)\dot{y}_{2р}(t) + y_{2р}(t) = Lx(t). \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (3) и (4) при нелинейном операторе L позволяет получить общее уравнение идентификации с исключением неизвестного входного сигнала $x(t)$:

$$L[b(\xi)\dot{y}_{1р}(t) + y_{1р}(t)] = b(\xi)\dot{y}_{2р}(t) + y_{2р}(t). \quad (5)$$

Нахождение текущего параметра $b(\xi)$ из выражения (5) связано с дифференцированием зашумленных выходных сигналов СИСрТИ $y_{1p}(t), y_{2p}(t)$, что является некорректной процедурой и приводит к большим погрешностям решения задачи идентификации [8]. Для исключения операций дифференцировании сигналов $y_{1p}(t), y_{2p}(t)$, а также влияния краевых условий на интервале наблюдения применим метод модулирующих функций [9]. Для этого умножим скалярно обе части уравнения (4) на некоторую n раз дифференцируемую в промежутке $[0; T_n]$ модулирующую функцию $\varphi(t)$ с краевыми условиями $\varphi^{(j)}(0) = \varphi^{(j)}(T_n) = 0, j = \overline{0, n-1}$. Здесь n – порядок дифференциального уравнения, описывающего модель основного канала СИСрТИ, T_n – интервал наблюдения (идентификации).

После интегрирования по частям с учетом краевых условий для модулирующей функции $\varphi(t)$ и нулевых начальных условий для основного и дополнительного каналов СИСрТИ уравнение идентификации при описании модели основного канала с помощью дифференциального уравнения n -го порядка примет вид [10]:

$$\sum_{j=1}^n b_j (-1)^j [\langle y_{1p}, \Phi^{(j)} \rangle - \langle y_{2p}, \varphi^{(j)} \rangle] = \langle y_{2p}, \varphi \rangle - \langle y_{1p}, \Phi \rangle, \quad (6)$$

где b_j – неизвестные параметры СИСрТИ; $\Phi(t) = L[\varphi(t)] = \varphi^2(t)$ – преобразованная модулирующая функция; $\langle p, q \rangle = \int_0^{T_n} p(t)q(t)dt$ – скалярное произведение функций $p(t), q(t)$.

При описании модели основного канала СИСрТИ с помощью выражения (3), которое является дифференциальным уравнением первого порядка ($n = 1$), после раскрытия скалярного произведения в формуле (6) преобразованное уравнение идентификации запишем как

$$b(\xi) \left[\int_0^{T_n} y_{2p}(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_n} y_{1p}(t)\dot{\Phi}(t)dt \right] = \int_0^{T_n} y_{2p}(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_n} y_{1p}(t)\Phi(t)dt. \quad (7)$$

В данном случае в качестве модулирующей функции можно использовать гармоническую функцию вида $\varphi(t) = \sin(2\pi t/T_n), 0 \leq t \leq T_n$.

Из выражения (7) найдем параметр $b(\xi)$:

$$\hat{b}(\xi) = \frac{\int_0^{T_n} y_{2p}(t)\varphi(t)dt - \int_0^{T_n} y_{1p}(t)\Phi(t)dt}{\int_0^{T_n} y_{2p}(t)\dot{\varphi}(t)dt - \int_0^{T_n} y_{1p}(t)\dot{\Phi}(t)dt}. \quad (8)$$

При использовании в качестве модели основного канала СИИС более общего выражения, например $b(\xi)\dot{y}_{1p}(t) + y_{1p}(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t)$, нелинейное предварительное преобразование входного сигнала $x(t)$ в дополнительном измерительном канале также позволяет выполнить текущую идентификацию нестабильных параметров $b(\xi), a_0(\xi), a_1(\xi)$ при неизвестном входном сигнале.

Также в системе текущей идентификации осуществляется расчет обратного оператора $F_{\text{осн.н}}^{-1}$ при номинальных значениях параметров основного измерительного канала для случая, когда влиянием ДФ на СрТИ можно пренебречь.

Уменьшение погрешности восстановления СрТИ связано с эффективным решением обратной задачи при работе СрТИ в динамическом режиме. Так как обратные задачи являются некорректно поставленными, то для их решения требуется принятие специальных мер для получения устойчивого решения [8]. Наиболее высокую точность восстановления дают методы, использующие максимум априорной информации. К таким методам относятся методы оптимальной фильтрации Винера и методы итерационного восстановления сигналов на основе фильтра Калмана.

При решении практических задач в процессе ТИ объем априорной информации зачастую ограничен знанием лишь максимальной частоты спектра контролируемого процесса, а также приближенными статистическими характеристиками погрешностей измерений и задания оператора СрТИ. В связи с этим приходится заменять оператор оптимальной фильтрации близким к нему квазиоптимальным регуляризирующим оператором, входящего в состав обратного

фильтра оператора восстановления, используя при этом ограниченный объем априорной информации для его построения. В работе [11] при решении подобных задач предложен алгоритм восстановления входных процессов для динамического режима ТИ в виде обратного цифрового фильтра, представленного с помощью последовательного соединения регуляризирующего предфильтра R (фильтра нижних частот (ФНЧ)) и обратного оператора F^{-1} СрТИ (рис. 3).

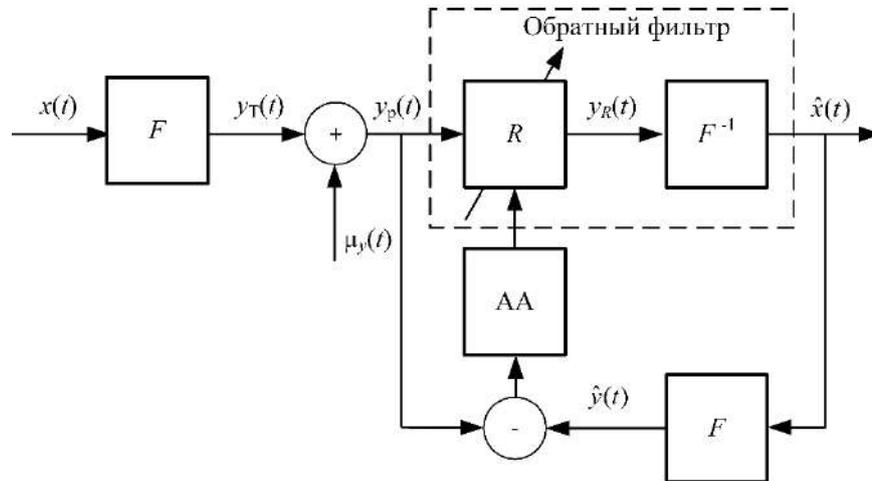


Рис. 3. Процедура восстановления входного телеметрируемого процесса $x(t)$ для динамического режима ТИ

Здесь АА – адаптивный алгоритм, с помощью которого осуществляется поиск оптимальных параметров регуляризирующего предфильтра R : частоты среза ФНЧ ω_c и его порядка n , минимизирующих обобщенную невязку $\Delta y(t) = y_p(t) - \hat{y}(t)$. Как показано в работе [11], процедуру минимизации обобщенной невязки выходного сигнала СрТИ можно строить лишь по одному параметру регуляризации – частоте среза предфильтра, оставляя фиксированным его порядок, что обеспечивает в сочетании с однородностью представления исходных данных, обратного оператора СрТИ и регуляризатора малые вычислительные затраты при реализации алгоритма восстановления.

Прямой $F_{\text{осн.н}}$ и обратный $F_{\text{осн.н}}^{-1}$ операторы основного измерительного канала СИСрТИ используются для расчета номинальных значений выходного и входного сигналов СрТИ с целью определения суммарных абсолютных дополнительных погрешностей ТИ, приведенные к выходу и ко входу СрТИ соответственно. Разности $\Delta x_{\Sigma} = \hat{x}_n - \hat{x}$ и $\Delta y_{\Sigma} = \hat{y}_n - y_{1p}$ путем их сравнения с допустимыми значениями погрешности ТИ по входу и выходу СрТИ можно использовать для метрологического самоконтроля интеллектуальных СИСрТИ в процессе ТИ в статическом и динамическом режимах в зависимости от динамики изменения входного телеметрируемого параметра.

Попадание величин Δx_{Σ} и Δy_{Σ} в допуски $\Delta x_{\Sigma} \leq x_{\text{доп}}$, $\Delta y_{\Sigma} \leq y_{\text{доп}}$ означает, что влиянием ДФ на СрТИ в процессе эксплуатации БС изделия РКТ можно пренебречь, использовать лишь прямой измерительный канал без учета дополнительного измерительного канала СрТИ и без применения квазиоптимального регуляризирующего оператора, входящего в состав обратного фильтра оператора восстановления.

С учетом высказанных замечаний модель процесса текущей идентификации динамических СрТИ и восстановления телеметрируемых параметров на основе введения минимальной структурной избыточности выглядит следующим образом (рис. 4).

Заключение

В работе рассмотрено построение модели процесса текущей (в процессе эксплуатации) идентификации динамических СрТИ при неизвестном входном сигнале на основе введения дополнительного измерительного канала и восстановления телеметрируемых параметров в виде обратного цифрового фильтра, представленного с помощью последовательного соединения регуляризирующего предфильтра (фильтра нижних частот) и обратного оператора СрТИ.

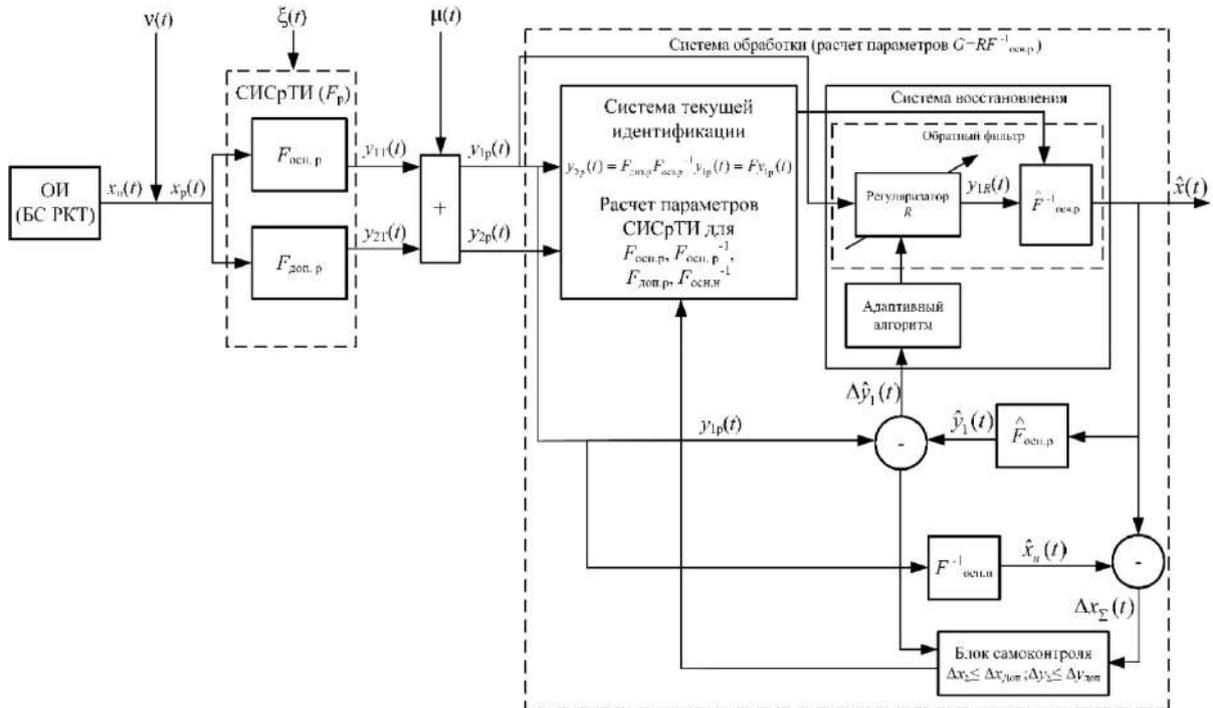


Рис. 4. Модель динамического СИСРТИ, идентификации его параметров и восстановления входного телеметрируемого процесса

Результаты исследований могут быть использованы для повышения точности измерительных систем в динамическом режиме измерений, в том числе в условиях воздействия неизвестных ДФ, частотный спектр лежит в спектре полезного сигнала, а также для метрологического самоконтроля в интеллектуальных измерительных системах.

Список литературы

1. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. [и др.]. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб. : Наука и техника, 2007. 667 с.
2. Бахшиян Б. Ц., Назиров Р. Р., Эльясберг П. Е. Определение и коррекция движения (гарантирующий подход). М. : Наука, 1980. 360 с.
3. Козырев Г. И., Усиков В. Д. Особенности синтеза обратного оператора статической структурно-избыточной измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 5–12.
4. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М. : Изд-во стандартов, 1972. 200 с.
5. Петров Б. Н., Викторов В. А., Лукин Б. В. Принцип инвариантности в измерительной технике. М. : Наука, 1976. 244 с.
6. Нестеров В. Н. От принципа двухканальности к теории построения инвариантных измерительных систем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 56–67.
7. Белорусец В. Б. Метод вспомогательных систем для идентификации динамических объектов при неизвестном входном сигнале // Автоматика и телемеханика. 1981. № 8. С. 76–82.
8. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. М. : Книга по Требованию, 2012. 228 с.
9. Шумафов М. М., Цей Р. Метод модулирующих функций и его применение при решении обратных задач // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4, Естественно-математические и технические науки. 2008. № 9. С. 9–22.
10. Козырев Г. И., Клейменов Ю. А., Усиков В. Д. Метод текущей идентификации линейной динамической измерительной системы на основе предварительного нелинейного преобразования входного сигнала // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 8–12.
11. Козырев Г. И., Юдицких Е. О. Восстановление входных сигналов динамических измерительных систем с помощью цифровой обратной фильтрации // Измерительная техника. 2023. № 5. С. 10–16. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16

References

1. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. et al. *Sovremennaya telemekhanika v teorii i na praktike = Modern telemetry in theory and in practice*. Saint Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007:667. (In Russ.)
2. Bakhshiyani B.Ts., Nazirov R.R., El'yasberg P.E. *Oprezhenie i korrektsiya dvizheniya (garantiruyushchiy podkhod) = Definition and correction of movement (a guaranteeing approach)*. Moscow: Nauka, 1980:360. (In Russ.)
3. Kozyrev G.I., Usikov V.D. Features of synthesis of the inverse operator of a static structurally redundant measuring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(4):5–12. (In Russ.)
4. Zemelman M.A. *Avtomaticheskaya korrektsiya pogreshnostey izmeritel'nykh ustroystv = Automatic error correction of measuring devices*. Moscow: Izd-vo standartov, 1972:200. (In Russ.)
5. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lukin B.V. *Printsip invariantnosti v izmeritel'noy tekhnike = The principle of invariance in measuring technology*. Moscow: Nauka, 1976:244. (In Russ.)
6. Nesterov V.N. From the principle of two-channel operation to the theory of construction of invariant measuring systems. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2020;23(4):56–67. (In Russ.)
7. Belorusets V.B. Method of auxiliary systems for identifying dynamic objects with an unknown input signal. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics*. 1981;(8):76–82. (In Russ.)
8. Tikhonov A.N., Goncharskiy A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach = Numerical methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2012:228. (In Russ.)
9. Shumafov M.M., Tsey R. The method of modulating functions and its application in solving inverse problems. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4, Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adygea State University, Series 4, Natural, Mathematical and Technical Sciences*. 2008;(9):9–22. (In Russ.)
10. Kozyrev G.I., Kleymenov Yu.A., Usikov V.D. A method of current identification of a linear dynamic measuring system based on a preliminary nonlinear transformation of the input signal. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2021;(12):8–12. (In Russ.)
11. Kozyrev G.I., Yuditskiy E.O. Restoration of input signals of dynamic measuring systems using digital reverse filtering. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2023;(5):10–16. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it.2023-5-10-16

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Козырев

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры телеметрических систем,
 комплексной обработки и защиты информации,
 Военно-космическая академия
 имени А. Ф. Можайского
 (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
 E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

Gennady I. Kozyrev

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department of telemetry systems,
 integrated information processing and protection,
 Military Space Academy
 named after A.F. Mozhaisky
 (13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Евгений Олегович Юдицкий

адъюнкт,
 Военно-космическая академия
 имени А. Ф. Можайского
 (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
 E-mail: eug-89@yandex.ru

Evgeny O. Yuditskiy

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 25.10.2024

Поступила после рецензирования / Revised 20.11.2024

Принята к публикации / Accepted 10.12.2024

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ СТЕНДА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

П. Е. Горшенин¹, Т. В. Горшенина², Д. В. Попченков³

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия
¹gpe2014@yandex.ru, ²tatiana/3113@mail.ru, ³popchenkov79@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является стенд высоких давлений. Предметом исследования являются способы усовершенствования систем стенда высоких давлений под современные требования. Целью работы является повышение достоверности результатов испытаний датчиков-преобразующей аппаратуры, сокращение трудоемкости выполнения операций настройки, испытаний. *Материалы и методы.* В процессе работы проведен анализ технического состояния и дефектация стенда, по результатам которых были определены направления его совершенствования, обеспечивающие высокую эффективность, производительность и достоверность процессов испытаний с одновременным увеличением диапазона воспроизводимых значений давления с учетом базовых принципов его работы и применения более современной и совершенной элементной базы. Изготовлены детали и узлы, а также выполнены их монтаж, сборка и доведение до рабочего состояния. Проведены пуско-наладочные работы, включающие комплексное опробование, наладку, а также подготовку стенда к производственному процессу. *Результаты.* За счет внедрения нового принципа действия системы подачи давления достигнуто увеличение диапазона воспроизводимых значений избыточного давления до 2000 кг/см², обеспечена подача избыточного давления на датчиков-преобразующую аппаратуру при одновременном воздействии пониженных температур до минус 196 °С. Использование вновь разработанного программного обеспечения позволило автоматизировать управление подачей жидкого азота. *Выводы.* Реализованные решения в целях совершенствования системы подачи избыточного давления и вновь разработанная конструкция стенда решают актуальные задачи создания датчиков-преобразующей аппаратуры для измерения давлений в жестких условиях, характерных для эксплуатации изделий ракетно-космической техники. Автоматизация стенда позволила сократить время регистрации аналоговых выходных сигналов при проведении испытаний, а также повысить точность и достоверность воспроизведения температуры за счет использования высокоточного цифрового регистрирующего оборудования и оптимизации процесса расхода жидкого азота для воспроизведения требуемых значений температуры.

Ключевые слова: воспроизведение давления, регулирование давления, подача жидкого азота, захлаживание

Для цитирования: Горшенин П. Е., Горшенина Т. В., Попченков Д. В. Совершенствование систем стенда высоких давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 14–19. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-2

IMPROVEMENT OF HIGH PRESSURE BENCH SYSTEMS

P.E. Gorshenin¹, T.V. Gorshenina², D.V. Popchenkov³

^{1,2,3} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia
¹gpe2014@yandex.ru, ²tatiana/3113@mail.ru, ³popchenkov79@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is a high-pressure stand. The subject of the study is the ways to improve the systems of the high-pressure stand to meet modern requirements. The purpose of the work is to increase the reliability of the DPA test results, reduce the complexity of performing tuning operations, tests. *Materials and methods.* In the process of improvement, an analysis of the technical condition and defect of the stand was carried out, according to the results of which the directions for improving the stand were determined, ensuring high efficiency, productivity and reliability of testing processes and increasing the range of reproducible pressure values, based on the basic principles of its operation and functioning, as well as through the use of a more modern and advanced element base. Parts and assemblies have been manufactured, as well as their installation and assembly to working condition. Commissioning works have been carried out, including comprehensive testing, commissioning of the stand, as well as preparation of the stand for the production process. *Results.* Due to the new principle of operation of the pressure supply system, an increase in the range of reproducible overpressure values up to 2000 kg/cm² was achieved, the supply of overpressure to the DPA was ensured while simultaneously exposed to low temperatures up to minus 196 °C. Thanks to the developed software, the control of the liquid nitrogen supply is automated. *Conclusions.* The implemented solutions in order to improve the overpressure supply system and the newly developed stand design solve the actual problems of sensor-converting equipment for measuring

pressures in harsh operating conditions typical for the operation of rocket and space technology products. Automation of the stand made it possible to achieve a reduction in the registration time of analog output signals during testing, increase the accuracy and reliability of temperature reproduction due to high-precision digital recording equipment, optimize the consumption of liquid nitrogen to reproduce the required temperature values.

Keywords: pressure reproduction, pressure regulation, liquid nitrogen supply, cooling down

For citation: Gorshenin P.E., Gorshenina T.V., Popchenkov D.V. Improvement of high pressure bench systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2025;(1):14–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-2

В условиях высокотехнологичного производства ракетно-космической техники к характеристикам применяемой датчиково-преобразующей аппаратуры (ДПА) предъявляются чрезвычайно высокие требования. Проведение испытаний с целью подтверждения характеристик является одной из наиболее важных стадий разработки и производства ДПА. При отсутствии современного испытательного оборудования, обеспечивающего воспроизведение условий испытаний, соответствующих реальным условиям эксплуатации, с заданными параметрами и требуемой точностью невозможно достоверно оценить качество выпускаемой ДПА [1].

Для повышения качества проведения испытаний в требуемых диапазонах избыточного давления возникла необходимость в новом испытательном стенде.

Объектом исследований является стенд высоких давлений, совершенствование систем которого производится под современные требования.

Основным назначением стенда является экспериментальная отработка ДПА статико-динамического давления на устойчивость к воздействию избыточного давления при одновременном воздействии пониженных температур.

Областью применения совершенствуемого стенда является обеспечение качества и надежности средств измерений давления, предназначенных для применения в составе ракетно-космической техники, в том числе: системах контроля отделения ступеней ракет, системах контроля и диагностики жидкостных ракетных двигателей, блоков хранения, блоках стандарта частоты водородного бортового синхронизирующего устройства, системах терморегулирования, герметичных отсеках и системе управления космических аппаратов, а также в составе объектов наземной космической инфраструктуры.

Полных функциональных аналогов стенда высоких давлений, обеспечивающих подачу избыточного давления на испытываемое изделие при одновременном его захлаживании не выявлено, но были определены изделия, обладающие схожими техническими характеристиками и функциональностью в части подачи избыточного давления и отдельно захлаживания изделия.

Работы по созданию стендов воспроизведения избыточного давления в мире проводят: ООО НПП «Элемер» [2], ООО «Альпапаскаль» [3, 4], WIKA Alexander Wiegand SE & Co.KG. В ходе оценки технического уровня стенда высоких давлений установлено его соответствие техническому уровню аналогов, как в части оборудования для воспроизведения избыточного давления, так и в части оборудования для воспроизведения пониженных температур.

Совершенствование систем стенда высоких давлений направлено на:

- увеличение диапазона воспроизводимых значений избыточного давления до 2000 кг/см²;
- обеспечение подачи избыточного давления на ДПА при одновременном воздействии пониженных температур до минус 196 °С;
- автоматизированное управление подачей жидкого азота;
- обеспечение возможности электрического подключения испытываемых и контрольных датчиков, имеющих различные присоединительные размеры, посредством измерительных кабелей, технологических кабельных перемычек;
- обеспечение возможности автоматизированной регистрации выходных сигналов испытываемой ДПА;
- продление ресурса работы стенда;
- сокращение трудоемкости выполнения операций настройки, испытаний;
- повышение достоверности результатов испытаний ДПА;
- повышение безопасности персонала;
- уменьшение габаритных размеров стенда.

Принцип работы стенда заключается в воздействии на мембрану испытываемого датчика избыточного давления при одновременном захлаживании датчика до значений температуры минус 196 °С.

Структурно стенд состоит из двух систем: системы подачи избыточного давления и системы подачи жидкого азота. Основным назначением системы подачи жидкого азота является захлаживание испытываемого датчика до температуры минус 196 °С. Система воспроизведения избыточного давления предназначена для подачи избыточного давления на приемную полость датчика и регистрацию его выходных сигналов в процессе проведения испытаний. Структурная схема стенда высоких давлений до совершенствования представлена на рис. 1.

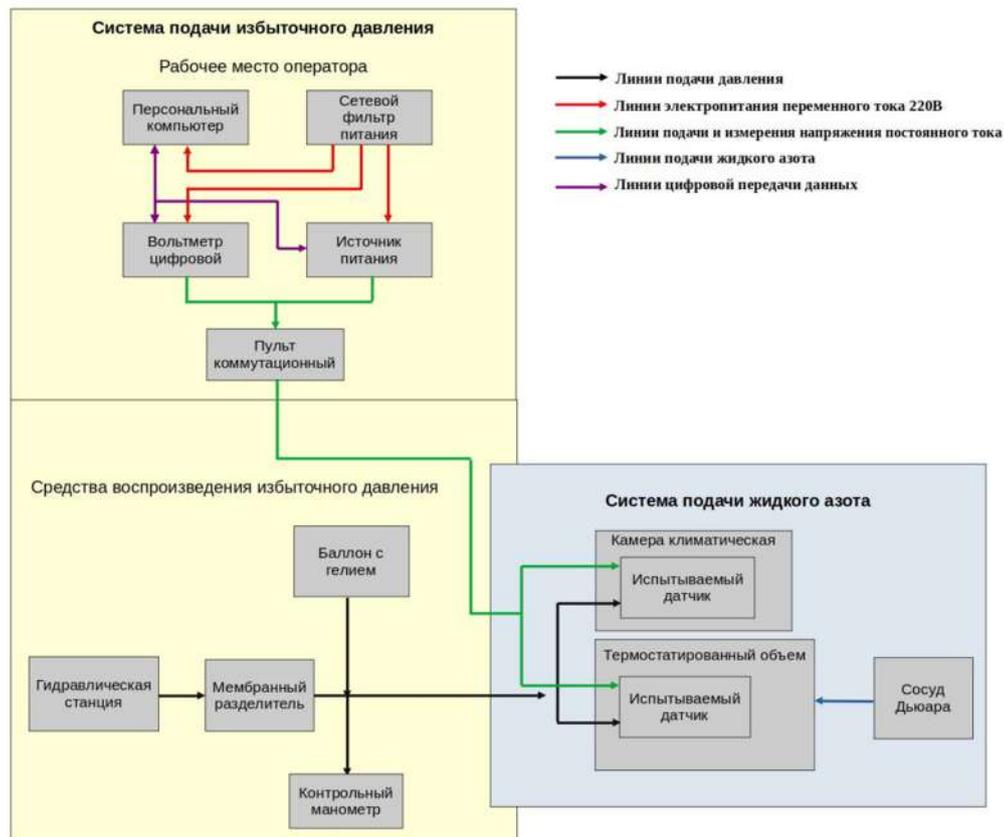


Рис. 1. Структурная схема исходного стенда высоких давлений

Принцип работы модернизированного стенда состоит в следующем: приспособление с подключенными к нему датчиками помещается в емкость и подключается к штуцеру трубопровода избыточного давления. Разъемы датчиков подключаются к кабелю вольтметра универсального цифрового. Предварительное захлаживание датчиков осуществляется при помощи камеры климатической [5], которая отсутствовала в исходном стенде. При достижении температуры ниже 60 °С камера климатическая отключается, дальнейшее захлаживание осуществляется жидким азотом.

Основным компонентом системы подачи избыточного давления, обеспечивающим сжатие гелия до значения избыточного давления 2000 кг/см², является мембранный разделитель. Принцип действия системы подачи избыточного давления заключается в сжатии гелия, которым заполнен трубопровод системы подачи избыточного давления и рабочий объем мембранного разделителя, путем перемещения мембраны мембранного разделителя под воздействием избыточного давления гидравлической жидкости, нагнетаемого гидравлической станцией [6]. Контроль текущего значения избыточного давления осуществляется при помощи цифрового манометра, установленного в магистрали избыточного давления, заполненной гелием [7].

Автоматизация стенда направлена на сокращение времени регистрации аналоговых выходных сигналов в процессе проведения испытаний, повышение точности и достоверности воспроизведения температуры, оптимизацию расхода жидкого азота для воспроизведения требуемых значений температуры [8].

Для решения задач автоматизации стенда разработано специализированное программное обеспечение. Программное обеспечение стенда обеспечивает управление средствами измерений, входящими в состав стенда, регистрацию измеренных выходных сигналов испытываемых датчиков, регистрацию параметров стенда в процессе проведения испытаний, диагностику работы стенда в процессе его эксплуатации [9, 10].

В рамках работы по совершенствованию систем стенда конструкция системы подачи избыточного давления переработана с учетом современных технологий, позволяющих обеспечить выполнение требуемых функций с учетом выполнения требований по безопасности персонала, требований эргономики и уменьшения габаритных размеров стенда, что привело к повышению максимального значения задаваемого давления.

С целью защиты оператора, стенда и испытываемых датчиков от повреждений вследствие разрушения элементов трубопровода предусмотрены все элементы с учетом устойчивости к превышению давления до значений более 3500 кг/см^2 [11].

С целью обеспечения выполнения требований надежности конструкция стенда включает в себя средства диагностирования и контроля работоспособности.

С учетом совершенствования структурная схема стенда принимает вид, представленный на рис. 2, 3.

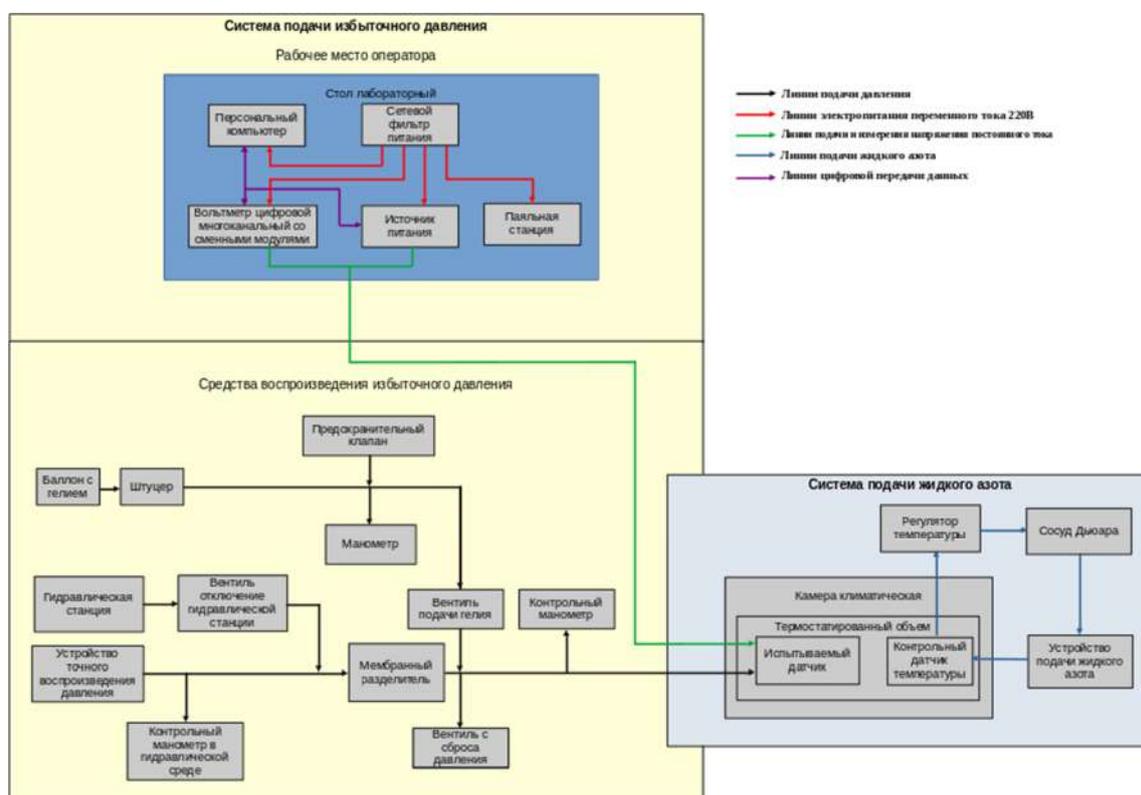


Рис. 2. Структурная схема усовершенствованного стенда высоких давлений



Рис. 3. Внешний вид усовершенствованного стенда высоких давлений

В процессе совершенствования системы стенда высоких давлений достигнуты следующие результаты:

- увеличение диапазона воспроизводимых значений избыточного давления до 2000 кг/см² за счет мембранного разделителя и дополнительного сжатия гелия;
- обеспечение подачи избыточного давления на ДПА при одновременном воздействии пониженных температур до минус 196 °С за счет модернизации системы с одновременной подачей избыточного давления и жидкого азота;
- за счет внедрения в данный стенд разработанного программного обеспечения достигнуты: автоматизированное управление подачей жидкого азота; обеспечение возможности автоматизированной регистрации выходных сигналов испытываемой ДПА; сокращение трудоемкости выполнения операций настройки, испытаний;
- обеспечение возможности электрического подключения испытываемых и контрольных датчиков, имеющих различные присоединительные размеры, посредством измерительных кабелей, технологических кабельных перемычек;
- повышение достоверности результатов испытаний ДПА, продление ресурса работы стенда за счет уменьшения погрешности высокоточного измерительного оборудования и совершенствования электронно-компонентной базы;
- повышение безопасности персонала за счет изменения конструкции и повышения предела прочности арматуры системы подачи давления и азота до 3500 кг/см²;
- уменьшение габаритных размеров стенда за счет применения современных материалов.

Реализованные решения в целях совершенствования системы подачи избыточного давления и вновь разработанная конструкция стенда решают актуальные задачи создания датчиков-преобразующей аппаратуры для измерения давлений в жестких условиях, характерных для эксплуатации изделий ракетно-космической техники.

Автоматизация стенда позволила сократить время регистрации аналоговых выходных сигналов при проведении испытаний на несколько часов в день, а также повысить точность измерения избыточного давления с 1,5 до 1,2 % за счет использования высокоточного цифрового регистрирующего оборудования и оптимизации процесса расхода жидкого азота для воспроизведения требуемых значений температуры.

Список литературы

1. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
2. ЭЛЕМЕР-СГП-1000 // Элемер. URL: <https://www.elemer.ru/catalog/metrologicheskoe-oborudovanie/zadatchiki-davleniya-pompy-pressy-kompressory/elemer-sgp-1000/?ysclid=li1kw36p917893-52104>
3. Манометры грузопоршневые «МП» // Альфапаскаль. URL: <https://alfapascal.ru/products/mp>
4. Устройства создания высокого давления УСД-2500, УСД-4000, УСД-7000 // Альфапаскаль. URL: <https://alfapascal.ru/products/usd?ysclid=li1kaja9q8824803267>
5. Настольная бесшумная камера холода и тепла SBT-291 // CryoTech. URL: <https://cryo-tech.ru/products/sb/sbt-291>.
6. Мини-маслостанция сверхвысокого давления МГС 2500-0.08П-Р-1 с пультом // МонтажКомплект. URL: <http://nasos-mgs.ru/product/maslostancii-mgs-2500-008p-r-1.html>
7. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры цифровые прецизионные ДМ5002М// Манотомь. URL: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometrytsifrovye/el/pretsiz-ionnyu-tsifrovoy-manometrdm5002m/?ysclid=li1kjujsr664657412>
8. ДТСхх4 термосопротивления с кабельным выводом//Овен. Оборудование для автоматизации. URL: https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom
9. ТРМ201 регулятор с универсальным входом и RS-485 // Овен. Оборудование для автоматизации. URL: <https://owen.ru/product/trm201>
10. Виноградова Н. А., Листратов Я. И., Свиридов Е. В. Разработка прикладного программного обеспечения в среде Lab-VIEW : учеб. пособие. М. : Изд-во МЭИ, 2015. С. 240.
11. ООО «ЦирлокРус». URL: <https://cir-lok.ru>

References

1. Bastygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;(3):18–25. (In Russ.)

2. ELEMER-SGP-1000. *Elemer*. (In Russ.). Available at: <https://www.elemer.ru/catalog/metrologicheskoe-oborudovanie/zadatchiki-davleniya-pompy-pressy-kompressory/elemer-sgp-1000/?ysclid=li1kw36p917893-52104>
3. MP cargo piston pressure gauges. *Al'fapaskal' = Alfapascal*. (In Russ.). Available at: <https://alfapascal.ru/products/mp>
4. High-pressure devices USD-2500, USD-4000, USD-7000. *Al'fapaskal' = Alfapascal*. (In Russ.). Available at: <https://alfapascal.ru/products/usd?ysclid=li1kaja9q8824803267>
5. Desktop silent cold and heat chamber SBT-291. *CryoTech*. (In Russ.). Available at: <https://cryotech.ru/products/sb/sbt-291>
6. Ultrahigh pressure mini oil station MGS 2500-0.08P-R-1 with remote control. *MontazhKomplekt*. (In Russ.). Available at: <http://nasos-mgs.ru/product/maslostancii-mgs-2500-008p-r-1.html>
7. Pressure gauges, vacuum meters, manovacuummeters, digital precision DM5002M. *Manotom' = Pressure gauge*. (In Russ.). Available at: <https://www.manotom.com/catalog/elektronnye/manometrytsifrovye/el/pretsiz-ionnyu-tsifrovoy-manometr5002m/?ysclid=li1kjujsr664657412>
8. DTXX4 thermal resistance with cable outlet. *Oven. Oborudovanie dlya avtomatizatsii = Aries. Automation equipment*. (In Russ.). Available at: https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom
9. TRM201 controller with universal input and RS-485. *Oven. Oborudovanie dlya avtomatizatsii = Aries. Automation equipment*. (In Russ.). Available at: <https://owen.ru/product/trm201>
10. Vinogradova N.A., Listratov Ya.I., Sviridov E.V. *Razrabotka prikladnogo programmnoho obespecheniya v srede Lab-VIEW: ucheb. posobie = Development of applied software in the LabVIEW environment : textbook*. Moscow: Izd-vo MEI, 2015:240. (In Russ.)
11. *OOO «TsirkRus» = CirlokRus LLC*. (In Russ.). Available at: <https://cir-lok.ru>

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Горшенин

ведущий инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: gpe2014@yandex.ru

Pavel E. Gorshenin

Lead engineer,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Татьяна Валерьевна Горшенина

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: tatiana/3113@mail.ru

Tatyana V. Gorshenina

Main expert,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Дмитрий Валентинович Попченков

начальник группы,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: popchenkov79@mail.ru

Dmitry V. Popchenkov

Head of the group,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 05.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.11.2024

Принята к публикации / Accepted 16.12.2024

СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫХ РОБОТОВ

Д. Е. Чикрин¹, К. Р. Смольникова², И. Г. Галиуллин³

^{1,2,3} Казанский федеральный университет, Казань, Россия

¹Dmitry.kfu@ya.ru, ²krsmolnikova@mail.ru, ³isgaluillin@email.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Коллаборативные роботы являются главным трендом в различных секторах промышленности, коботы позволяют трансформировать рабочие пространства и увеличивать производительность. Обеспечение безопасности при взаимодействии оператора и кобота является одним из ключевых вопросов при внедрении коботов в производство. *Материалы и методы.* Рассматриваются основные технические стандарты безопасности, регулирующие проектирование, установку и эксплуатацию коботов, такие как: ГОСТ Р 60.1.2.1-2016/ИСО 10218-1:2011; ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016; ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. В основной части статьи анализируются ключевые аспекты безопасности коллаборативной робототехники, включая оценку рисков сценариев взаимодействия оператора и кобота в совместном рабочем пространстве; принципы проектирования безопасного рабочего пространства; технические средства обеспечения безопасности (датчики, системы аварийного останова, ограничение силы и скорости); методы валидации и верификации безопасности коботов. Анализируются технологические проблемы, которые определяет кобототехника, а также описываются возможные решения в целях оптимизации взаимодействия кобота и оператора в целом. *Результаты и выводы.* Соблюдение представленных рекомендаций позволит не только минимизировать риски, связанные с использованием коботов, но и раскрыть весь потенциал коллаборативной робототехники для создания эргономичных, безопасных и высокопроизводительных рабочих мест будущего.

Ключевые слова: коллаборативные роботы, безопасность, взаимодействие человека и робота

Финансирование: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Для цитирования: Чикрин Д. Е., Смольникова К. Р., Галиуллин И. Г. Стандарты безопасности для коллаборативных роботов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 20–27. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-3

SAFETY STANDARDS FOR COLLABORATIVE ROBOTS

D.E. Chikrin¹, K.R. Smolnikova², I.G. Galiullin³

^{1,2,3} Kazan Federal University, Kazan, Russia

¹Dmitry.kfu@ya.ru, ²krsmolnikova@mail.ru, ³isgaluillin@email.com

Abstract. *Background.* Collaborative robots are a major trend in various industry sectors as cobots transform workspaces and increase productivity. Ensuring safety in operator-cobot interactions is one of the key issues when introducing cobots into manufacturing. *Materials and methods.* This article reviews the main technical safety standards governing the design, installation and operation of cobots, such as: ISO 10218-1:2011; ISO/TS 15066:2016; ISO 10218-2:2011. The main part of the article analyses key aspects of collaborative robotics safety, including: risk assessment of scenarios of operator-cobot interaction in a collaborative workspace; principles of safe workspace design; technical means of safety (sensors, emergency stop systems, force and speed limitation); methods of validation and verification of cobot safety. The paper also analyses technological problems that cobotics defines and describes possible solutions in order to optimise the interaction between cobots and the operator as a whole. *Results and conclusions.* Compliance with the presented recommendations will not only minimize the risks associated with the use of cobots, but also unlock the full potential of collaborative robotics to create economical, safe and high-performance workplaces of the future.

Keywords: collaborative robots, safety, human-robot interaction

Financing: the work was carried out at the expense of the Strategic Academic Leadership Program of the Kazan (Volga Region) Federal University (PRIORITY 2030).

For citation: Chikrin D.E., Smolnikova K.R., Galiullin I.G. Safety standards for collaborative robots. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):20–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-3

Введение

Коботы динамично внедряются на промышленных предприятиях, поскольку отличаются легкостью, компактностью, а также низкой стоимостью на фоне стоимости промышленных роботов. Производственные процессы требуют гибкости, эффективности, безопасности. При проектировании коботов безопасности уделяется особое внимание, так как коботы работают во взаимодействии с операторами, распределяя функции между собой в целях эффективного взаимодействия и повышения производительности.

Традиционные промышленные роботы имеют высокую значимость как эффективное дополнение к крупносерийным, высокоскоростным производствам. Так, например, станки ЧПУ непрерывно выполняют высокоточные задачи долгие годы, периодически останавливаясь на техобслуживание.

В свою очередь коботы сочетают в себе преимущества промышленных роботов одновременно с навыками и способностями людей, иными словами – комплекс умственного и физического труда. Однако поскольку коботы делят совместное рабочее пространство с операторами, требуются сложные инженерные решения для повышения производительности при одновременном обеспечении безопасности операторов при совместной работе.

Скорость, сила и точность остаются важными функциональными характеристиками кобота, но для наиболее эффективного использования преимуществ совместной работы оператору и коботу необходимо работать в должной согласованности. Одновременно с этим для обеспечения безопасной совместной работы принципиально важно осознание коботами, где находятся операторы, как двигаются, в том числе какую силу прикладывают при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте во время совместной работы [1].

Коллаборативный робот предусматривает два вида остановок, каждая из которых имеет свои особенности. Защитная остановка предназначена для включения либо выключения во время совместной работы, в частности в сценариях контролируемой остановки с расчетной безопасностью и контроль скорости и разделения. В данных сценариях необходимо связать защитную остановку кобота с программой, управляющей захватом, для того, чтобы после остановки захват возобновил свое движение с той же скоростью, силой и положением, которые были заданы до остановки.

Аварийная остановка используется после потери питания, в частности в аварийных ситуациях. После такой остановки необходимо перезагрузить кобота, чтобы продолжить работу. Однако функция аварийной остановки представляет собой потенциально опасную ситуацию, так как возможна потеря деталей в захвате кобота. Поэтому необходимо питание захвата кобота также связывать с аварийной остановкой, т.е. внедрять функцию самоблокировки захвата.

Таким образом, ключевые задачи при проектировании коботов заключаются в следующем:

- 1) безопасное взаимодействие с операторами и осторожная работа со сборочным оборудованием;
- 2) скорость кобота во время работы должна быть совместимой с возможностями оператора;
- 3) компактные и легкие форм-факторы кобота.

Проектирование, установка и эксплуатация коллаборативных роботов: проблемы безопасности, оценка рисков, проектирование рабочего пространства, технические средства обеспечения безопасности, методы валидации и верификации, рекомендации

Ключевой фактор при разработке коллаборативных роботов, в отличие от промышленных, заключается в том, что оператор и робот делят одно и то же совместное рабочее пространство. Коботы специально проектируются для совместной работы с оператором для решения различных задач, которые невозможно полностью автоматизировать.

В соответствии с техническим стандартом промышленный робот – это автоматически управляемый, перепрограммируемый, многоцелевой манипулятор, программируемый по трем или более степеням подвижности, который может либо быть установлен стационарно на рабочем месте, либо может иметь возможность передвижения для использования в системах промышленной автоматизации¹.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.1–2016/ИСО 10218-1:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы.

Данная характеристика промышленного робота соответствует роботу, который проектируется для самостоятельной работы, т.е. без участия человека. Такие роботы выполняют задачи в соответствии с заданной программой без прямого взаимодействия с оператором в рабочем пространстве. В данном случае пользователи находятся на значительном расстоянии, а в целях исключения повреждений – роботы находятся в защищенных пространствах, которые ограждаются специальными защитными ограждениями. Внешние защитные устройства вызывают остановку промышленного робота, а в случае преднамеренного входа пользователем в зону работы робота для технического обслуживания или перепрограммирования робот отключается, а манипуляторы фиксируются в безопасном положении¹.

В случае с коботом производителю необходимо учитывать несколько ключевых факторов: непредсказуемость движений оператора, безопасное реагирование, не применение чрезмерной силы при намеренном либо непреднамеренном физическом контакте. Следовательно, в части должного уровня безопасности вышеперечисленные факторы усложняют задачу при разработке и производстве коботов, поскольку в отличие от промышленных роботов, системы безопасности в коботах обычно интегрированы в структуру и управляются системами кобота.

В настоящее время коботы проектируются в соответствии с техническим стандартом, в котором подчеркивается важность целостности системы управления, связанной с безопасностью, реализуемой системой управления, особенно в отношении контроля таких параметров технологического режима, как скорость и сила².

Также указанный стандарт описывает общую информацию, на которую необходимо ориентироваться разработчикам для безопасной организации совместной работы с коботами, например, информацию о необходимости и важности проведения оценки рисков. Так как никакая конструкция кобота не может считаться максимально безопасной, если кобот будет размахивать острым предметом с помощью манипулятора [2].

Необходимо уделять особе внимание не только конструкции кобота, но и окружающей среде, например, если совместное рабочее пространство заблокировано препятствиями, оператор может оказаться в зоне защемления и быть поврежден коботом. Именно поэтому ключевые разделы стандарта описывают требования к организации совместных рабочих пространств, проектированию совместной работы и переходов между коллаборативными и неколлаборативными операциями.

В частности, подробно описывается реализация следующих требований к совместной работе в целях соблюдения безопасности оператора и эффективного выполнения задач:

1. Контролируемая остановка с расчетной безопасностью.

Данный метод совместной работы подразумевает гарантированную остановку кобота без отключения питания прежде, чем оператор войдет в совместное рабочее пространство. В данном методе нет одновременной работы, кобот работает самостоятельно, когда оператор отсутствует в совместном рабочем пространстве, как только оператор входит в совместное рабочее пространство, например, для погрузки деталей в манипулятор, то в таком случае срабатывает контролируемая остановка с расчетной безопасностью и кобот останавливается.

Данный сценарий применяется в ситуациях, когда полное прекращение движения кобота не требуется, однако требуется обеспечить безопасность оператора при его приближении. Система безопасности кобота непрерывно отслеживает присутствие оператора в совместном рабочем пространстве, используя датчики (лазерные сканеры, системы машинного зрения, датчики приближения) [3].

Контролируемая остановка с расчетной безопасностью также в целях устранения различных опасностей и снижение рисков при проектировании рабочего пространства предусматривает специальные зоны безопасности, например, при обнаружении оператора в опасной близости кобот плавно снижает скорость и останавливается в заранее рассчитанной точке, обеспечивая безопасное расстояние до оператора. Движение кобота не возобновляется до тех пор, пока оператор не покинет опасную зону [4].

В настоящее время контролируемая остановка с расчетной безопасностью является устоявшейся технологией для промышленных роботов, использующая защитные ограждения для осуществления аварийной остановки, когда пользователь входит в зону работы робота.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция.

² ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком.

Преимущество контролируемой остановки с расчетной безопасностью заключается в увеличении производительности, плавности движений и гибкости. В данном методе робот при каждом приближении оператора полностью не останавливается, остановка происходит плавно, а также имеется возможность гибко настраивать зоны безопасности и параметры остановки в зависимости от конкретной задачи и условий работы [5].

Вместе с тем необходимо отметить, что технические стандарты предъявляют требования к контролируемой остановке с расчетной безопасностью. Так, используемые датчики, системы управления и торможения, которые обнаруживают оператора в совместном рабочем пространстве, должны удовлетворять требованиям подраздела 5.12 и требованиям пункта 5.5.3. ИСО 10218-1:2011 [1]. Также требуется провести детальную оценку рисков для всех сценариев взаимодействия и настроить контролируемую остановку с расчетной безопасностью с учетом выявленных рисков.

Совместное рабочее пространство необходимо проектировать в соответствии с требованиями технического стандарта¹. Одновременно с этим система контролируемой остановки с расчетной безопасностью должна пройти процедуры валидации и верификации, чтобы подтвердить безопасность и надежность, в том числе все ли предсказуемые опасности были выявлены и корректирующие действия предприняты при оценке рисков².

2. Ручное управление.

Данный метод подразумевает совместную работу оператора и робота, однако перед началом совместной работы роботу необходимо перейти в состояние контролируемой остановки с расчетной безопасностью.

Во время совместной работы оператор находится в прямом контакте с манипулятором робота для передачи команд. Оператор непосредственно управляет движениями робота, физически перемещая манипулятор. В данном методе безопасность оператора зависит от следующих факторов:

2.1. Необходимо предусмотреть программное ограничение степеней подвижности и пространства с расчетной безопасностью, если у оператора ограничен диапазон перемещений робота.

2.2. Необходимо оснащение робота задающим устройством, обеспечивающим возможность активации аварийной остановки. Например, если оператор вошел в совместное рабочее пространство прежде, чем робот был подготовлен для выполнения задач в режиме ручного управления.

2.3. Необходимо оснащение робота деблокирующим устройством для возможности переключения между ручным управлением и неколлаборативной работой.

Метод ручного управления имеет несколько преимуществ, таких как интуитивность и простота, гибкость и адаптивность, упрощенные настройки. Метод ручного управления не требует сложного программирования, так как оператор обучает робота, управляя им по необходимой траектории. Такой сценарий идеально подходит для задач с переменными параметрами, где требуется неоднократная смена траектории или корректировка движений [6].

Впрочем, режим ручного управления имеет некоторые недостатки, в частности: низкая точность, опыт оператора, ограниченность применения и снижение производительности во время ручного управления. При использовании метода ручного управления требуется уделять особое внимание безопасности оператора, обеспечивая надежную обратную связь между оператором и роботом, в том числе внедряя системы аварийной остановки.

3. Контроль скорости и разделения.

Данный метод предусматривает коллаборативную работу, поскольку позволяет оператору и роботу одновременно перемещаться по рабочему совместному пространству посредством постоянного поддержания защитного расстояния.

В целях поддержания защитного расстояния в роботе необходимо предусмотреть функцию контролируемой скорости с расчетной безопасностью и функцию контролируемой остановки с расчетной безопасностью. Такие системы контроля скорости и разделения позволяют оператору работать «рука об руку» с роботом, а в случае близкого сближения – робот останавливается.

¹ ГОСТ ИСО 13855–2006. Безопасность оборудования. Расположение защитных устройств с учетом скоростей приближения частей тела человека.

² ГОСТ Р 60.1.2.2–2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция.

Контроль скорости и разделения основан на принципе поддержания безопасного расстояния между оператором и роботом: чем ближе оператор, тем медленнее движется кобот. В данном методе кобот может работать с оптимальной скоростью, замедляясь только при приближении оператора, что позволяет достигнуть большей производительности по сравнению с методами, требующими полной остановки.

Контроль скорости и разделения требует точной и надежной системы отслеживания расстояния и скорости с использованием датчиков, камер и программного обеспечения. Эффективность данного метода может снижаться в условиях плохой видимости, при наличии препятствий или отражающих поверхностей в рабочей зоне. В том числе время реакции на приближение оператора должно быть минимальным в целях избежания столкновения [7].

4. Ограничение мощности и силы.

Данный метод предусматривает намеренный либо непреднамеренный физический контакт во время совместной работы.

В целях минимизации рисков необходимо эксплуатировать робота, который специально предназначен для этого типа работы. Тем не менее при проектировании роботов предусмотреть в совместной работе метод «ограничение мощности и силы» является одной из самых сложных задач.

Ограничение мощности и силы подразумевает, что кобот спроектирован и настроен таким образом, чтобы сила и энергия, прилагаемые им при контакте с человеком, оставались ниже опасного для человека уровня [8].

Для совместной работы в данном сценарии принципиально необходимо ограничить мощность, силу и скорость, чтобы предотвратить травмы оператора. В приложении к техническому стандарту представлены рекомендации по определению пороговых значений таких параметров на основе данных о болевой чувствительности человека¹.

При проектировании робота, который не причинит вреда оператору, даже при ограничении мощности и силы требуется комплексный подход. Необходимо проведение тщательного анализа рисков, связанных с конкретными задачами и средой его работы, в том числе глубокое понимание порогов болевой чувствительности человека при различных типах контактов с учетом разных частей тела. Конструктивные решения по снижению рисков для предотвращения квазистатического и кратковременного контактов:

- 1) использование приводов с контролируемым крутящим моментом, ограничивающим силу, прилагаемую роботом;
- 2) внедрение механических ограничителей диапазона движения для предотвращения столкновения с высокой энергией;
- 3) использование мягких материалов, поглощающих энергию удара;
- 4) использование пружин или других элементов, смягчающих удар в случае столкновения;
- 5) использование конструкции робота без острых краев и углов с минимальной площадью поверхности, контактирующей с оператором.

Кроме того, необходимо тщательное тестирование робота в различных сценариях для проверки эффективности мер безопасности, а также подтверждение того, что остаточный риск после внедрения мер безопасности является приемлемым.

Заключение

Промышленный робот и кобот имеют схожие задачи. Однако промышленные роботы, имея высокую производительность, сложны в настройке, а коботы, в свою очередь, имея более низкую производительность, доступны в простой настройке, поскольку для программирования робота не требуется дополнительный специально обученный персонал. Также промышленные роботы имеют ряд отличий, такие как:

- 1) не могут находиться в одном рабочем пространстве с пользователями;
- 2) сложность в программировании и настройке;
- 3) частая переналадка в случае частой смены выпускаемой продукции;
- 4) долгая окупаемость.

¹ ГОСТ Р 60.1.2.3–2021/ISO/TS 15066:2016. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком.

Внедрение роботов на производстве открывает широкие перспективы для повышения эффективности и безопасности операторов во время совместной работы. Однако успешная интеграция роботов требует комплексного подхода к вопросам безопасности, начиная с этапа проектирования и заканчивая эксплуатацией. Какие риски возникают при взаимодействии оператора и робота, как создать безопасную среду для совместного взаимодействия? Как убедиться в безопасности системы робот-оператор?

Понимание вышеперечисленных аспектов критически важно для успешного внедрения роботов на производство и создание безопасной и эффективной совместной работы оператора и робота.

Проектирование роботов в соответствии с техническими стандартами имеет решающее значение для обеспечения безопасности оператора, в том числе необходимо учитывать такие факторы, как расстояние между оператором и роботом, планирование траектории и скорость движения.

В данной статье были рассмотрены ключевые аспекты обеспечения безопасности при совместной работе с роботами, включая:

- 1) необходимость в оценке рисков на всех этапах жизненного цикла системы робота;
- 2) проектирование рабочего пространства с учетом специфики совместной работы оператора и робота;
- 3) применение технических средств обеспечения безопасности, таких как системы ограничения скорости и усилия, датчики приближения, системы машинного зрения;
- 4) внедрение надежных методов валидации и верификации для подтверждения соответствия системы требованиям безопасности.

Соблюдение представленных рекомендаций позволит не только минимизировать риски, связанные с использованием роботов, но и раскрыть весь потенциал коллаборативной робототехники для создания эргономичных, безопасных и высокопроизводительных рабочих мест будущего.

Нормативное регулирование в части безопасного взаимодействия оператора и робота должно развиваться и непрерывно совершенствоваться по мере развития технологий и соблюдать баланс интересов всех субъектов.

Список литературы

1. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. URL: https://www.researchgate.net/publication/335113271_Review_on_Human-Robot_Interaction_During_Collaboration_in_a_Shared_Workspace (дата обращения: 08.05.2024).
2. When is a robot a cobot? Moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators. URL: https://www.researchgate.net/publication/371694537_WHEN_IS_A_ROBOT_A_COBOT_MOVING_BEYOND_MANUFACTURING_AND_ARM-BASED_COBOT_MANIPULATORS (дата обращения: 08.05.2024).
3. A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment. URL: https://www.researchgate.net/publication/379567349_A_review_of_external_sensors_for_human_detection_in_a_human_robot_collaborative_environment (дата обращения: 08.05.2024).
4. Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments. URL: https://www.researchgate.net/publication/351303372_Fast_and_Safe_Trajectory_Planning_Solving_the_Cobot_PerformanceSafety_Trade-Off_in_Human-Robot_Shared_Environments (дата обращения: 08.05.2024).
5. Application of Dynamically Scaled Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016 for Collaborative Robotics. URL: https://www.researchgate.net/publication/342008998_Application_of_Dynamically_Scaled_Safety_Zones_Based_on_the_ISOTS_150662016_for_Collaborative_Robotics (дата обращения: 08.05.2024).
6. Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task. URL: https://www.researchgate.net/publication/3114436_Manual_Control_Approach_to_the_Teaching_of_a_Robot_Task (дата обращения: 08.05.2024).
7. Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems. URL: https://www.researchgate.net/publication/369995431_Optimization_of_the_Speed_Separation_Monitoring_Protective_Separation_Distance_in_Human-Robot_Collaboration_Safety_Systems (дата обращения: 08.05.2024).
8. Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration. URL: https://www.researchgate.net/publication/333510361_Power_and_force_limiting_on_industrial_robots_for_human-robot_collaboration (дата обращения: 08.05.2024).

References

1. *Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/335113271_Review_on_Human-Robot_Interaction_During_Collaboration_in_a_Shared_Workspace (accessed 08.05.2024).
2. *When is a robot a cobot? Moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371694537_WHEN_IS_A_ROBOT_A_COBOT_MOVING_BEYOND_MANUFACTURING_AND_ARM-BASED_COBOT_MANIPULATORS (accessed 08.05.2024).
3. *A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/379567349_A_review_of_external_sensors_for_human_detection_in_a_human_robot_collaborative_environment (accessed 08.05.2024).
4. *Fast and Safe Trajectory Planning: Solving the Cobot Performance/Safety Trade-Off in Human-Robot Shared Environments*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351303372_Fast_and_Safe_Trajectory_Planning_Solving_the_Cobot_PerformanceSafety_Trade-Off_in_Human-Robot_Shared_Environments (accessed 08.05.2024).
5. *Application of Dynamically Scaled Safety Zones Based on the ISO/TS 15066:2016 for Collaborative Robotics*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342008998_Application_of_Dynamically_Scaled_Safety_Zones_Based_on_the_ISOTS_150662016_for_Collaborative_Robotics (accessed 08.05.2024).
6. *Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/3114436_Manual_Control_Approach_to_the_Teaching_of_a_Robot_Task (accessed 08.05.2024).
7. *Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/369995431_Optimization_of_the_Speed_Separation_Monitoring_Protective_Separation_Distance_in_Human-Robot_Collaboration_Safety_Systems (accessed 08.05.2024).
8. *Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/333510361_Power_and_force_limiting_on_industrial_robots_for_human-robot_collaboration (accessed 08.05.2024).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Евгеньевич Чикрин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры анализа данных
и технологий программирования,
директор Института вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: Dmitry.kfu@ya.ru

Dmitriy E. Chikrin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of data analysis
and programming technologies,
director of the Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

Камилла Рустемовна Смольникова

аспирант,
Институт вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: krsmolnikova@mail.ru

Kamilla R. Smolnikova

Postgraduate student,
Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

Искандер Гаязович Галиуллин

соискатель,
Институт вычислительной математики
и информационных технологий,
Казанский федеральный университет
(Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18)
E-mail: isgaluillin@email.com

Iskander G. Galiullin

Applicant,
Institute of Computational Mathematics
and Information Technology,
Kazan Federal University
(18 Kremlevskaya street, Kazan, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 28.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024

Принята к публикации/Accepted 18.12.2024

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

В. Д. Ежижанский¹, Д. С. Бояркин², Д. А. Голушко³,
И. Р. Абузьяров⁴, А. В. Лысенко⁵

^{1,2,3,4} Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹vityastalkerxdxd@gmail.com, ²boyarkyndmytry@gmail.com,

³dmitgoluschko@yandex.ru, ⁴0400@npp-rubin.ru, ⁵lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Использование природного газа в качестве топлива получает все большую популярность, так как газ более экологичен и дешевле, по сравнению с бензином. Для заправки техники газовым топливом используется автомобильная газонаполнительная компрессорная станция, где осуществляются сжатие и осушка природного газа. Обработка газа сопряжена с повышенными требованиями к условиям эксплуатации и промышленной безопасности, поэтому контроль показателей состояния станции целесообразно автоматизировать при помощи создания информационно-измерительной системы жизнеобеспечения. Для осуществления работы всего функционала такой системы необходимо разработать алгоритм управления. *Материалы и методы.* Для создания алгоритма работы автоматизированной системы применяются методы дискретной математики и логики. Разработана циклично повторяющаяся последовательность действий по проверке логических условий и изменению состояния выходных данных алгоритма. *Результаты.* Обоснована необходимость автоматизации информационно-измерительной системы жизнеобеспечения автомобильной газонаполнительной компрессорной станции. Приведена структура информационно-измерительной системы с описанием функций и состава ее элементов. Представлен в графическом виде алгоритм управления системой жизнеобеспечения и обоснована его структура. *Выводы.* Разработанный алгоритм управления информационно-измерительной системой жизнеобеспечения обеспечивает безопасную эксплуатацию и поддержание рабочих условий для эффективного функционирования автомобильной газонаполнительной станции. Опасные факторы, возникающие при работе со сжатым газом, необходимо контролировать в автоматическом режиме, чтобы снизить влияние человеческого фактора.

Ключевые слова: алгоритм, автоматизация, управление, информационно-измерительная система жизнеобеспечения, промышленная безопасность, загазованность, терморегуляция, программируемый логический контроллер, автомобильная газонаполнительная компрессорная станция

Для цитирования: Ежижанский В. Д., Бояркин Д. С., Голушко Д. А., Абузьяров И. Р., Лысенко А. В. Алгоритм управления информационно-измерительной системой жизнеобеспечения автомобильной газонаполнительной компрессорной станции // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 28–33. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-4

THE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE INFORMATION AND MEASURING LIFE SUPPORT SYSTEM OF AN AUTOMOTIVE GAS FILLING COMPRESSOR STATION

V.D. Yezhizhanskiy¹, D.S. Boyarkin², D.A. Golushko³, I.R. Abuzyarov⁴, A.V. Lysenko⁵

^{1,2,3,4} Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹vityastalkerxdxd@gmail.com, ²boyarkyndmytry@gmail.com,

³dmitgoluschko@yandex.ru, ⁴0400@npp-rubin.ru, ⁵lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* The use of natural gas as a fuel is becoming increasingly popular, as gas is more environmentally friendly and cheaper than gasoline. To refuel equipment with gas fuel, an automotive gas-filling compressor station is used, where compression and drying of natural gas are carried out. Gas treatment is associated with increased requirements for operating conditions and safety, therefore, it is advisable to automate the monitoring of station status indicators

by creating an automated information and measurement life support system. To implement the entire functionality of such a system, it is necessary to develop a control algorithm. *Materials and methods.* Methods of discrete mathematics and logic are used to create an algorithm for the operation of an automated system. A cyclically repeating sequence of actions for checking logical conditions and changing the state of the output data of the algorithm has been developed. *Results.* The article substantiates the need to automate the information and measurement life support system of an automotive gas filling compressor station. The structure of the information and measurement system with a description of the functions and composition of its elements is given. The algorithm of life support system management is presented graphically and its structure is substantiated. *Conclusions.* The developed algorithm for controlling the information and measuring life support system ensures safe operation and maintenance of working conditions for the effective functioning of an automotive gas filling station. The hazards that arise when working with compressed gas must be controlled automatically in order to reduce the influence of the human factor.

Keywords: algorithm, automation, control, information and measuring life support system, industrial safety, gas pollution, thermoregulation, programmable logic controller, automotive gas filling compressor station

For citation: Yezhizhanskiy V.D., Boyarkin D.S., Golushko D.A., Abuzyarov I.R., Lysenko A.V. The algorithm for controlling the information and measuring life support system of an automotive gas filling compressor station. *Izmenenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):28–33. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-4

Введение

Автомобильная газонаполнительная компрессорная станция (АГНКС) – это станция, применяющаяся для заправки автомобилей компримированным природным газом (КПГ). Наличие влаги в газовом топливе снижает его рабочие характеристики, поэтому КПГ целесообразно осушать, для этого в составе станции применяется установка осушки.

Используемый в АГНКС и установке осушки газ сжимается компрессором до давления 25 МПа, что вызывает нагрев КПГ и выделение тепла. При этом газ, смешанный с воздухом, является пожароопасным и взрывоопасным. Эти факторы накладывают ограничения на условия эксплуатации и ужесточают требования промышленной безопасности при работе станции. К газонаполнительной станции предъявляются требования в части температуры воздуха внутри помещения, содержания метана в воздухе, а также выполнения требований промышленной безопасности и недопущения возгораний и взрывов¹.

С целью удовлетворения всех требований к АГНКС применяется информационно-измерительная система жизнеобеспечения (ИИСЖО).

Информационно-измерительная система жизнеобеспечения

Аппаратура автоматизации ИИСЖО используется для получения данных о контролируемых параметрах станции, принятия решений и осуществления управляющих параметрами воздействий. ИИСЖО АГНКС должна отслеживать и регулировать температуру и содержание метана в воздухе станции и следить за наличием дыма/воспламенения.

Для решения этих задач ИИСЖО имеет в своем составе несколько подсистем:

1. Терморегулятор. Представляет собой совокупность термосопротивлений, радиаторов отопления и вентиляторов, что позволяет считывать температуру воздуха и включать/выключать в нужное время элементы нагрева и охлаждения. Для дополнительного оттока воздуха от главного компрессора над ним находится управляемая электроприводом взрывозащищенным (ЭПВ) задвижка.

2. Контроль содержания газа в воздухе. Применяются газоанализаторы ИГС-98 и вентиляторы для продувки помещения станции, благодаря которым возможно детектирование утечек газа и противодействие образованию его взрывоопасной концентрации.

3. Система противопожарной защиты. Состоит из датчиков типа ИДТ-2 ИБ, прибора контрольно-приемного Корунд 1-ИМ, а также пожарного клапана, управляемого ЭПВ. Эта подсистема фиксирует наличие дыма или пламени и, закрывая заслонку клапана, перекрывает доступ кислорода к зоне пожара.

4. Система обесточивания АГНКС. На входе электропитания всей газонаполнительной станции установлен электромагнитный пускатель ПМЛ-1160, коммутируемый управляемым реле, благодаря этому возможно в любой момент произвести аварийное полное обесточивание всей станции.

¹ ГОСТ 1510–84. Межгосударственный стандарт. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

5. Самодиагностика и сигнализация. Приводы ЭПВ имеют концевые выключатели, что позволяет отслеживать их положение и выявлять неисправности в работе. В случае возникновения сбоев или аварийных ситуаций в работе АГНКС срабатывает визуальная и звуковая индикация.

Функционирование ИИСЖО должно происходить непрерывно, а управляющие решения принимаются автоматически, без участия человека. Поэтому основным элементом ИИСЖО является программируемый логический контроллер (ПЛК), осуществляющий автоматизацию работы системы [1].

ПЛК функционирует в соответствии с загруженным в него алгоритмом управления, построенном на принципах логики и дискретной математики [2–4].

Алгоритм управления информационно-измерительной системой жизнеобеспечения

Алгоритм управления ИИСЖО АГНКС представлен на рис. 1.

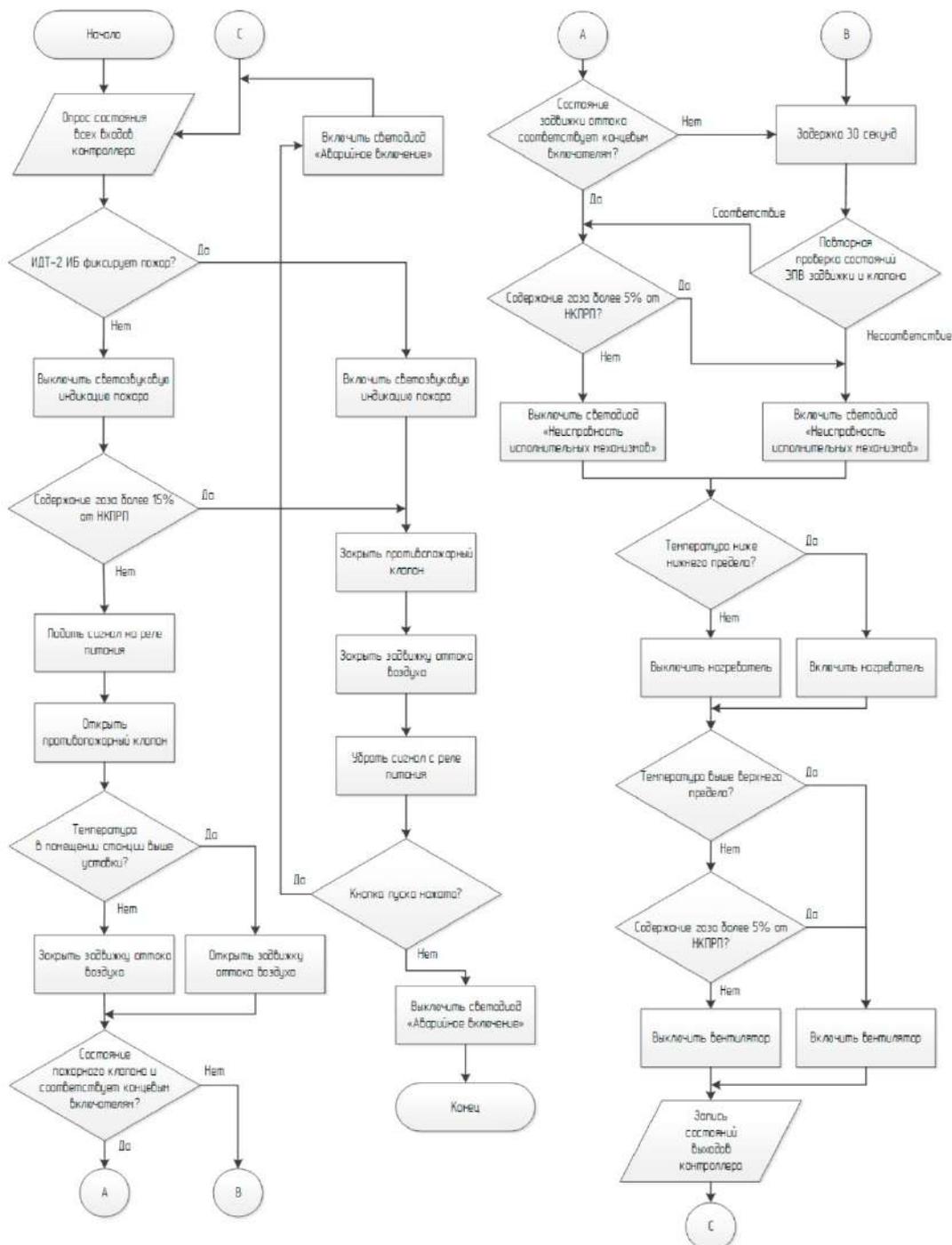


Рис. 1. Алгоритм управления информационно-измерительной системой жизнеобеспечения автомобильной газонаполнительной компрессорной станции

Работа программируемого логического контроллера в системах жизнеобеспечения заключается в многократном повторении следующего цикла:

- 1) считывается состояние входов;
- 2) выполняются логические операции;
- 3) результаты работы записываются на выходы.

В составе ИИССЖО АГНКС первый пункт будет заключаться в получении значений параметров с датчиковой аппаратуры входами контроллера. Датчики температуры и газоанализатор систем жизнеобеспечения передают аналоговые значения на аналоговые входы контроллера, а приемно-контрольный прибор Корунд 1-ИМ, получив сигнал от пожарного извещателя, замыкает цепь дискретного входа ПЛК. Концевые выключатели, фиксирующие положение ЭПВ-приводов также выдают дискретный сигнал.

После получения данных со всех датчиков системы целесообразно в первую очередь провести проверку условий обесточивания газонаполнительной станции. Обесточивание должно произойти, если пожарный извещатель ИДТ-2 ИБ зафиксирует наличие задымления/возгорания или если концентрация газа, считываемая газоанализатором ИГС-98 Марш, превысит величину в 15 % от НКПРП.

В случае выполнения хотя бы одного из условий закрываются противопожарный клапан и задвижка, а реле, коммутирующее цепь питания всей станции, размыкается. В составе системы присутствует кнопка для пуска системы, расположенная вне газонаполнительной станции на удаленном терминале. Это позволяет обслуживающему персоналу запускать станцию дистанционно, не подвергая себя опасности, в случае аварийной ситуации на АГНКС. При нажатии кнопки цепь питания замыкается независимо от состояния реле, после чего происходит проверка условий обесточивания.

При попытке включения аварийно обесточенной АГНКС с помощью кнопки пуска включится светодиод «Аварийное включение».

Если аварийная ситуация на станции вызвана пожаром, то включается светозвуковая сигнализация, работающая от встроенного аккумулятора прибора Корунд 1-ИМ, за счет чего сигнализация будет работать при отсутствии внешнего питания (обесточивание).

Если не выполняется ни одно условие обесточивания, то реле управления питанием АГНКС замыкается, после чего кнопку пуска нужно отпустить. Только после этого станция должна осуществлять управляющие воздействия.

По умолчанию противопожарный клапан должен быть открыт, чтобы обеспечивать обновление воздушных масс внутри станции. Задвижка оттока воздуха над главным компрессором должна быть открыта только, если температура воздуха снаружи АГНКС превышает заданный предел.

Для контроля исправности работы задвижки оттока и противопожарного клапана нужно проверить соответствие их состояний данным, полученным с концевых выключателей.

Учитывая, что открытие/закрытие ЭПВ происходит не мгновенно, целесообразно, в случае несоответствия состояний ЭПВ и выключателей провести повторную проверку условий через 30 с. За это время исправный ЭПВ-привод должен полностью открыться или закрыться.

Если при повторной проверке спустя 30 с условие не выполняется снова, включается светодиод «Неисправность исполнительных механизмов», сигнализирующий о необходимости проверить работоспособность приводов задвижки и клапана. Также этот светодиод целесообразно включить в том случае, если при работе станции возникла небольшая утечка газа (концентрация свыше 5 % от НКПРП), которая не вызывает необходимости останавливать работу газонаполнительной станции и полностью обесточивать систему. Такая функция позволит оператору обнаружить факт утечки и своевременно устранить неисправности газового оборудования.

После проверки всех условий обесточивания, условий открытия/закрытия ЭПВ-приводов задвижки и клапана, а также самодиагностики исполнительных механизмов ИИССЖО нужно осуществить контроль и регулировку (при необходимости) температуры воздуха внутри помещений АГНКС.

Включение нагревателей происходит при понижении температуры ниже разности нижнего предела и гистерезиса или если нагреватель уже включен, то он останется включенным, пока температура не достигнет суммы нижнего предела и гистерезиса.

Аналогично происходит включение/выключение вентиляторов охлаждения: включение при превышении температурой суммы верхнего предела и гистерезиса и выключение при снижении температуры ниже разности верхнего предела и гистерезиса. Независимо от температуры, вентилятор включится при превышении концентрацией газа предела в 5 % от НКПРП для принудительного обновления воздуха внутри газонаполнительной станции и снижения концентрации КПП [5].

После осуществления всех логических операций управления системой происходит запись состояний выходов логического контроллера. Дискретные выходы ПЛК замыкают цепи питания реле, которые коммутируют питание всех исполнительных механизмов системы.

Рассмотренный алгоритм позволяет в автоматическом режиме обеспечивать безопасное функционирование и эксплуатацию АГНКС.

Заключение

Информационно-измерительная система жизнеобеспечения автомобильной газонаполнительной компрессорной станции делает возможным автоматический контроль ситуации (пожарная безопасность) и управление эксплуатационными характеристиками (температура и концентрация КПП в воздухе) при работе станции.

Для оперативного извещения персонала АГНКС о складывающейся аварийной обстановке или неисправностях ИИСЖО включает в себя средства обнаружения неполадок ЭПВ (концевые включатели), а также светодиодную и звуковую индикацию.

Для управления системой целесообразно применять представленный алгоритм, включающий в себя ввод внешней информации с датчиков, реализацию логических операций контроля и мониторинга, а также вывод информации на подключенные исполнительные механизмы.

Список литературы

1. Калинин Ц. И., Куницын Р. А., Багаев А. А. Программируемые логические контроллеры в системе автоматизации : учеб. пособие. Барнаул : Лань, 2016. 111 с.
2. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates // Proceedings of the 19th international conference on soft computing and measurements, SCM 2016 (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016). Saint-Petersburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 416–418. doi: 10.1109/scm.2016.7519798 EDN: xfnvox
3. Голушко Д. А., Ежижанский В. Д., Асеев Е. А. [и др.]. Анализ способов автоматизации систем жизнеобеспечения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 2. С. 223–226.
4. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Методы повышения точности прогнозирования показателей надежности наукоемких сложных электронных систем // Современные информационные технологии. 2014. № 19. С. 183–187.
5. Солнцев В. Б., Пономарев М. В., Подсевалов Д. С. Взрывозащита электрооборудования во взрывобезопасных газовых средах. М. : Литрес, 2021. 100 с.

References

1. Kalinin Ts.I., Kunitsyn R.A., Bagaev A.A. *Programmiruemye logicheskie kontrollery v sisteme avtomatizatsii: ucheb. posobie* = Programmable logic controllers in an automation system : textbook. Barnaul: Lan', 2016:111. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Tankov G.V., Lysenko A.V., Trusov V.A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates. *Proceedings of the 19th international conference on soft computing and measurements, SCM 2016 (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016:416–418. doi: 10.1109/scm.2016.7519798 EDN xfnvox
3. Golushko D.A., Ezhizhanskiy V.D., Aseev E.A. et al. Analysis of automation methods of life support systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;2:223–226. (In Russ.)
4. Yurkov N.K., Zatylykin A.V., Polesskiy S.N. et al. Methods for improving the accuracy of forecasting reliability indicators of high-tech complex electronic systems. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):183–187. (In Russ.)
5. Solntsev V.B., Ponomarev M.V., Podsevalov D.S. *Vzryvozashchita elektrooborudovaniya vo vzryvobezopasnykh gazovykh sredakh = Explosion protection of electrical equipment in explosion-proof gas environments*. Moscow: Litres, 2021:100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Дмитриевич Ежижанский

инженер,

Научно-производственное предприятие «Рубин»

(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: vityastalkerxdxd@gmail.com

Viktor D. Yezhizhansky

Engineer,

Scientific and Production Enterprise «Rubin»

(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Дмитрий Сергеевич Бояркин

техник-конструктор,
Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: boyarkyndmytry@gmail.com

Dmitry S. Boyarkin

Technician designer,
Scientific and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Дмитрий Александрович Голушко

кандидат технических наук, начальник отдела,
Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: dmitgoluschko@yandex.ru

Dmitry A. Golushko

Candidate of technical sciences, head of the department,
Scientific and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Ильдар Ринатович Абузяров

начальник отделения,
Научно-производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: 0400@npp-rubin.ru

Ildar R. Abuzyarov

Head of the department,
Scientific and Production Enterprise «Rubin»
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: luysenko_av@bk.ru

Alexey V. Lysenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
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 23.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2024

Принята к публикации/Accepted 16.12.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 004.89/65.011.56

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-5

ГЕНЕРАТИВНЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПЛАНИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА

В. Р. Александров¹, А. А. Щеткин², А. С. Бевз³

^{1,2,3} Научно-производственное предприятие «Исток имени А. И. Шокина», Фрязино, Московская обл., Россия
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² aaschetkin@istokmw.ru, ³ asbevz@istokmw.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном производстве все большее значение приобретает оптимизация производственных процессов. Одним из эффективных инструментов, позволяющих достичь этой цели, является применение MES/APS-систем (*Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling*) в сочетании с ПоТ (Industrial Internet of Things) и искусственным интеллектом (ИИ), что качественно влияет на разработку и внедрение новых методов и средств механизации, автоматизации, роботизации и цифровизации приборостроительного производства, обеспечивающих повышение производительности, снижение трудоемкости и повышение экономичности производства с учетом решения вопросов обеспечения надежности, экологической безопасности окружающей среды и возможности внедрения в цифровые информационные технологии. В данной статье мы рассмотрим перспективы и вызовы, связанные с применением этих технологий, а также обсудим возможность использования MES/APS в качестве цифрового помощника диспетчера. *Материалы и методы.* Исследования основываются на взаимодействии комплекса программных и аппаратных средств MES/APS, ИИ и отечественной платформы промышленного интернета вещей ПоТ.Istok. *Результаты.* Представлен обзор работы цифрового помощника и краткий анализ. *Выводы.* Представленное исследование использования MES/APS с ИИ в качестве цифрового помощника может повысить показатели эффективности производства путем автоматизации рабочего места диспетчера производства.

Ключевые слова: производство, машинное обучение, ТОиР, планирование, ОЕЕ, промышленный интернет вещей, нейронная сеть, оптимизация, дашборд, киберфизическая система, SCADA, big-data, умное производство, искусственный интеллект, объекты планирования, графы

Для цитирования: Александров В. Р., Щеткин А. А., Бевз А. С. Генеративный искусственный интеллект в планировании производства // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 34–45. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-5

GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANUFACTURING PLANNING

V.R. Aleksandrov¹, A.A. Shchetkin², A.S. Bevz³

^{1,2,3} Research and Production Enterprise "Istok named after A.I. Shokin", Fryazino, Moscow region, Russia
¹ vrleksandrov@istokmw.ru, ² aaschetkin@istokmw.ru, ³ asbevz@istokmw.ru

Abstract. Background. In modern manufacturing, optimization of production processes is becoming increasingly important. One of the effective tools to achieve this goal is the use of MES/APS systems (Manufacturing Execution System/Advanced Planning and Scheduling) in combination with IIoT (Industrial Internet of Things) and artificial intelligence (AI), which qualitatively affects the development and implementation of new methods and means of mechanization, automation, robotics and digitalization of instrument-making production, ensuring increased productivity, reduced labor intensity, increased cost-effectiveness of production, taking into account the solution of issues of ensuring reliability, environmental safety and the possibility of implementation in digital information technologies. In this article, we will consider the prospects and challenges associated with the use of these technologies, and discuss the possibility of using MES/APS as a digital assistant for the dispatcher. *Materials and methods.* The research is based on the interaction of a set of MES/APS software and hardware, AI and the domestic Industrial Internet of Things Platform IIoT.Istok. *Results.* The article provides an overview of the digital assistant and a brief analysis. *Conclusions.* The presented research on the use of MES/APS with AI as a digital assistant can improve production efficiency by automating the production manager's workplace.

Keywords: manufacturing, machine learning, maintenance and repair, planning, OEE, industrial Internet of Things, neural network, optimization, dashboard, cyber-physical system, SCADA, big data, smart manufacturing, artificial intelligence, planning objects, graphs

For citation: Aleksandrov V.R., Shchetkin A.A., Bezv A.S. Generative artificial intelligence in manufacturing planning. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):34–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-5

Введение

Стандартный цикл управления современным предприятием, показанный на рис. 1, поддерживается различными средствами автоматизации, использующими специальные вычислительные процедуры. Как правило, они интегрированы в единую автоматизированную систему управления, основанную на стандартизованных процессах и обеспечивающую единство, целостность используемых данных. Примерами такого подхода являются различные ERP-системы [1–5], широко применяемые в промышленности.

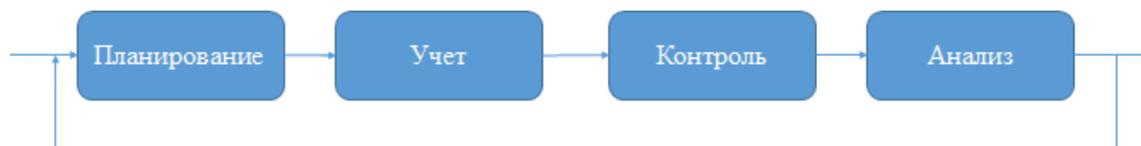


Рис. 1. Цикл управления

Важнейшими процедурами являются расчет потребности в материалах и расчет потребности в производственных мощностях.

Эти классические методы эффективны, если ассортимент продукции предприятия обеспечен гарантированным спросом и не меняется или редко меняется. Для применения расчетных процедур необходимо наличие максимально полной нормативной базы предприятия, включая нормативы складского хранения, нормативные сроки и объемы поставок, производственные и финансовые нормативы [6].

Если эти условия не выполнены или выполнены частично, то нужно искать дополнительные пути повышения эффективности управления. Один из них – совместное использование классических расчетных процедур и вычислительных методов ИИ.

Материалы и методы

MES/APS-системы представляют собой комплекс программных и аппаратных средств, предназначенных для автоматизации производственных процессов. Они позволяют контролировать работу оборудования, управлять производственными процессами и оптимизировать использование ресурсов. Применение MES/APS-систем позволяет повысить эффективность производства, снизить затраты на производство и улучшить качество продукции.

IIoT представляет собой сеть взаимосвязанных устройств, которые собирают и передают данные о производственных процессах в режиме реального времени. Эти данные могут быть использованы для обучения ИИ и разработки алгоритмов, способных анализировать большие объемы информации и принимать решения на основе полученных данных.

В качестве системы IoT рассматривалась отечественная Платформа промышленного интернета вещей IoT.Istok [7], в которую интегрированы возможности не только мониторинга оборудования, но и диспетчеризации, а также возможность работать с разными видами оборудования: технологическим и инженерным. Объединенные функции на базе одной киберфизической системы – IoT и SCADA – позволяют организовать оперативный контроль технологии производства и, в частности, контроль электронной гигиены производства. Применение IoT в сочетании с ИИ позволяет создавать интеллектуальные системы, способные адаптироваться к изменяющимся условиям производства и оптимизировать производственные процессы [8, 9].

Одной из перспективных областей применения MES/APS-систем с использованием ИИ является создание цифрового помощника диспетчера. Диспетчер, работающий в производственном цехе, отвечает за оперативное планирование и контроль за ходом производственного процесса, своевременное реагирование на нештатные ситуации и координацию работы персонала. Использование MES/APS с ИИ в качестве цифрового помощника может значительно облегчить работу диспетчера производства и повысить эффективность управления производством.

Этапы работы ИИ совместно с MES/APS:

– **сбор данных:** MES/APS-система собирает данные о ходе производственного процесса, включая информацию о работе оборудования, параметрах производственных процессов и других важных показателях;

– **анализ данных:** ИИ анализирует собранные данные и выявляет закономерности, которые могут быть использованы для оптимизации производственных процессов;

– **принятие решений:** На основе анализа данных ИИ принимает решения о том, какие меры необходимо предпринять для оптимизации производственных процессов;

– **взаимодействие с диспетчером:** MES/APS-система взаимодействует с диспетчером, предоставляя ему информацию о ходе производственного процесса и предлагая меры по его оптимизации.

Преимущества использования MES/APS в качестве цифрового помощника:

– **снижение нагрузки на диспетчера:** MES/APS-система может взять на себя часть задач, связанных с контролем за ходом производственного процесса, что позволит диспетчеру сосредоточиться на более сложных задачах;

– **повышение эффективности производства:** MES/APS-система может предложить меры по оптимизации производственных процессов, что приведет к повышению эффективности производства;

– **предотвращение нештатных ситуаций:** MES/APS-система может своевременно выявить признаки нештатных ситуаций и предложить меры по их предотвращению.

Результаты

Для проверки эффективности использования MES/APS-систем, взаимодействующих с ИИ, было проведено исследование посредством эксперимента «симуляция процесса принятия решений в рамках одного цеха».

Для симуляции был выбран абстрактный цех (далее – цех) металлообработки, симуляция выполнялась на LLM (англ. *Large Language Model* – большая языковая модель) GPT 4o Mini. В работе цеха для проведения симуляции были отобраны следующие объекты:

- 1) материал (заготовка);
- 2) деталь;
- 3) станок;
- 4) работник.

Также в симуляции принимают участие вспомогательные объекты с состоянием:

- 1) заказ;
- 2) график работы работников;
- 3) текущее выполнение плана по производству деталей;
- 4) текущее состояние склада.

В ходе исследования в первую очередь были изучены процессы, протекающие на производстве, с учетом этого была сформирована абстрактная модель производства.

Для модели производства был составлен синтетический датасет (от англ. *dataset* – набор данных), состоящий из объектов системы и переменных, которые меняются в зависимости от кейса (табл. 1).

Таблица 1

Набор данных и ответы модели

Часть структуры	Кейс № 1	Кейс № 2	Кейс № 3	Кейс № 4	Кейс № 5
1	2	3	4	5	6
Входные данные					
Определение предметной области симуляции	Ты являешься начальником производственного цеха «Фрезерной обработки», который отвечает за производство деталей в поставленные сроки на основе Заказа. Цех представляет собой систему процессов и элементов (объектов), как статических и динамических. Также есть вспомогательные процессы и элементы (объекты) системы				
Описание взаимодействия элементов (объектов) системы	<p>Склад предназначен для хранения материалов (болванок); Материал (болванка) предназначен для изготовления деталей на станках. Из каждого материала можно изготавливать разные детали; Материалы (болванки) для производства: [«Сталь», «Сплав Х», «Медь», «Железо»] Деталь (готовая) – результат обработки материалов на станках. Деталь может производиться из разных материалов. У детали есть среднее время производства; Производимые детали: [«Корпус», «Стойка», «Стакан», «Болт», «Вал», «Шпиндель», «Втулка»] Время (в часах), затрачиваемое на изготовление каждой детали: {«Корпус»: 4, «Стойка»: 2, «Стакан»: 3, «Болт»: 1, «Вал»: 2, «Шпиндель»: 1, «Втулка»: 4} Материалы, из которых изготавливаются детали (представлен словарь, где ключ – требуемый материал, а значение – список производимых деталей из этого материала): { «Сталь»: [«Корпус», «Стойка», «Вал»], «Сплав Х»: [«Корпус», «Болт», «Вал»], «Медь»: [«Стакан», «Шпиндель», «Втулка»], «Железо»: [«Корпус», «Шпиндель», «Втулка»] } Станки, которые изготавливают определенные детали (представлен словарь, где ключ – станок, а значение – список производимых деталей этим станком): { «ЧПУ станок 001»: [«Корпус», «Стойка», «Стакан»], «ЧПУ станок 002»: [«Болт», «Корпус», «Стойка»], «ЧПУ станок 003»: [«Болт», «Вал», «Шпиндель»], «ЧПУ станок 004»: [«Вал», «Шпиндель», «Втулка»], «ЧПУ станок 005»: [«Корпус», «Болт», «Втулка»] }</p>				

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
	<p>Станок предназначен для производства деталей. За станком могут работать определенные работники. Станок может ломаться и для его починки требуется некоторое время; Используются станки:</p> <p>[«ЧПУ станок 001», «ЧПУ станок 002», «ЧПУ станок 003», «ЧПУ станок 004», «ЧПУ станок 005»]</p> <p>Работник требуется для управления станком. У работника есть свой перечень станков, на которых он работает;</p> <p>Работники цеха:</p> <p>[«Иванов», «Кокорин», «Бодров», «Салотов», «Ворогов», «Самойлов», «Чайкин», «Лапин», «Широв», «Быстров»]</p> <p>Станки, на которых могут работать работники цеха:</p> <p>{</p> <p>«Иванов»: [«ЧПУ станок 001», «ЧПУ станок 002»],</p> <p>«Кокорин»: [«ЧПУ станок 001», «ЧПУ станок 002»],</p> <p>«Бодров»: [«ЧПУ станок 003», «ЧПУ станок 004»],</p> <p>«Салотов»: [«ЧПУ станок 003», «ЧПУ станок 004»],</p> <p>«Ворогов»: [«ЧПУ станок 005», «ЧПУ станок 001»],</p> <p>«Самойлов»: [«ЧПУ станок 005», «ЧПУ станок 001»],</p> <p>«Чайкин»: [«ЧПУ станок 002», «ЧПУ станок 003»],</p> <p>«Лапин»: [«ЧПУ станок 002», «ЧПУ станок 003»],</p> <p>«Широв»: [«ЧПУ станок 004», «ЧПУ станок 005»],</p> <p>«Быстров»: [«ЧПУ станок 004», «ЧПУ станок 005»],</p> <p>«Заменов»: [«ЧПУ станок 001», «ЧПУ станок 002», «ЧПУ станок 003», «ЧПУ станок 004», «ЧПУ станок 005»]</p> <p>}</p>				
<p>Описание процессов</p>		<p>Цех – это производственная единица предприятия. Для каждого цеха поступает заказ на производство деталей. На основе этого заказа формируется планирование производства цеха, а именно составляется План-график работников (кто в какую смену работает), План производства деталей (что к какому числу требуется произвести и в каком количестве) и План закупки материалов (что и когда требуется закупить).</p> <p>План-график работников статичный, но может динамически изменяться в зависимости от нагрузки. Обычно в План-графике работников 2 смены. Первая смена с 7:00 до 15:30, вторая смена с 15:30 до 24:00. Иногда может добавляться третья смена (внештатная) с 24:00 до 7:30. Еще есть 0,5 часа на обед (не рабочее время), то есть каждый работник в смену работает 8 часов. Штатное расписание работников по схеме 5/2 (5 – рабочих дней, 2 – выходных дня):</p> <p>{</p> <p>«Смена 1»: [«Иванов», «Кокорин», «Бодров», «Салотов», «Ворогов»],</p> <p>«Смена 2»: [«Самойлов», «Чайкин», «Лапин», «Широв», «Быстров»],</p> <p>«Смена 3»: []</p> <p>}</p>			

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
<p>Базовые варианты принятия решений</p>	<p>Представлены проблема и варианты ее решения:</p>				<p>«Отсутствует работник X на своей смене по любой причине»: [«Если работа работника X влияет на производственный план цеха, то требуется заменить его другим работником Y на срок отсутствия работника X», «Если нет оптимального решения, то требуется сдвинуть сроки сдачи заказа и потом применить какое-то одно из вышесказанных решений»], «Сломался в цеху станок X»: [«Отправить на починку станок X», «Если работа станка X влияет на производственный план цеха и есть станок, который может заменить на время починки станка X, то требуется вызвать свободных работников в каковую-либо смену или поменять приоритеты производства внутри цеха, чтобы успеть выполнить все заказы», «Если работа станка X влияет на производственный план цеха и нет станка, который может заменить на время починки станка X, то требуется после починки станка X перепланировать производство, чтобы успеть вовремя выполнить заказ», «Если нет оптимального решения, то требуется сдвинуть сроки сдачи заказа и потом применить какое-то одно из вышесказанных решений»], «Отсутствуют требуемые материалы для производства»: [«Если требуемые материалы в нужном количестве отсутствуют на Складе, то требуется материалы заказать», «Если нет оптимального решения, то требуется сдвинуть сроки сдачи заказа и потом применить какое-то одно из вышесказанных решений»], «Резко изменились приоритеты заказов»: [«Требуется оптимально перепланировать производство и как варианты: или вызвать свободных работников в дополнительный смену, или заказать материалы, или доставить материалы с Главного склада, или сдвинуть сроки заказа(-ов)», «Если нет оптимального решения, то требуется сдвинуть сроки сдачи заказа и потом применить какое-то одно из вышесказанных решений»], «Произошла чрезвычайная ситуация в масштабах цеха»: [«Если эта чрезвычайная ситуация влияет на производственный план, то требуется свободных работников вызвать в дополнительную смену на свободные станки, чтобы успеть выполнить заказы в срок», «Если нет оптимального решения, то требуется сдвинуть сроки сдачи заказа и потом применить какое-то одно из вышесказанных решений»]</p>

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Текущее состояние цеха: Заказы	<p>Заказы (представлен словарь, где ключ – название заказа, а значение – список требуемых деталей, их Количество и Срок (через сколько часов заказ должен быть выполнен)):</p> <p>{</p> <p> «Заказ 1»: {</p> <p> «Срок (через сколько часов должно быть готово)»: 336,</p> <p> «Требуемые детали и их количество»: {</p> <p> «Корпус»: 5,</p> <p> «Стойка»: 10,</p> <p> «Болт»: 40,</p> <p> «Стакан»: 20,</p> <p> «Вал»: 5,</p> <p> «Шпindelь»: 10,</p> <p> «Втулка»: 20</p> <p> }</p> <p> }</p> <p>}</p>				<p>Заказы (представлен словарь, где ключ – название заказа, а значение – список требуемых деталей, их Количество и Срок (через сколько часов заказ должен быть выполнен)):</p> <p>{</p> <p> «Заказ 1»: {</p> <p> «Срок (через сколько часов должно быть готово)»: 240, «Требуемые детали и их количество»:</p> <p> {</p> <p> «Корпус»: 5, «Стойка»: 10, «Болт»: 40 } ,</p> <p> «Заказ 2»:</p> <p> {</p> <p> «Срок (через сколько часов должно быть готово)»: 160, «Требуемые детали и их количество»: {</p> <p> «Шпindelь»: 10, «Втулка»: 20 } } ,</p> <p> «Заказ 3»: {</p> <p> «Срок (через сколько часов должно быть готово)»: 160, «Требуемые детали и их количество»: {</p> <p> «Стакан»: 20, «Вал»: 5 } } }</p>
Текущее состояние цеха: Готовые детали	<p>Готовые детали на данный момент (представлен словарь, где ключ – название готовой детали, а значение – количество изготовленных деталей):</p> <p>{</p> <p> «Корпус»: 2,</p> <p> «Стойка»: 3,</p> <p> «Стакан»: 4,</p> <p> «Болт»: 10,</p> <p> «Вал»: 3,</p> <p> «Шпindelь»: 10,</p> <p> «Втулка»: 5</p> <p>}</p>				<p>Готовые детали на данный момент (представлен словарь, где ключ – название готовой детали, а значение – количество изготовленных деталей):</p> <p>{</p> <p> «Корпус»: 0,</p> <p> «Стойка»: 0,</p> <p> «Стакан»: 0,</p> <p> «Болт»: 0,</p> <p> «Вал»: 0,</p> <p> «Шпindelь»: 0,</p> <p> «Втулка»: 0</p> <p>}</p>

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Текущее состояние: Доступные материалы	Доступные материалы на складе (представлен словарь, где ключ – материал (болванка), а значение – количество этого материала (болванок): { «Сталь»: 100, «Сшлав Х»: 100, «Медь»: 100, «Железо»: 100 }	Доступные материалы на складе (представлен словарь, где ключ – материал (болванка), а значение – количество этого материала (болванок): { «Сталь»: 20, «Сшлав Х»: 20, «Медь»: 20, «Железо»: 20 }	Доступные материалы на складе (представлен словарь, где ключ – материал (болванка), а значение – количество этого материала (болванок): { «Сталь»: 100, «Сшлав Х»: 100, «Медь»: 100, «Железо»: 100 }	Доступные материалы на складе (представлен словарь, а значение – количество этого материала (болванок): { «Сталь»: 30, «Сшлав Х»: 50, «Медь»: 25, «Железо»: 60 }	Доступные материалы на складе (представлен словарь, а значение – количество этого материала (болванок): { «Сталь»: 30, «Сшлав Х»: 50, «Медь»: 25, «Железо»: 60 }
Критичные изменения в работе цеха за прошлый день	Изменений не было.	Изменений не было.	[«Заболел работник Иванов (отсутствует 480 часов)», «Вышел из строя ЧПУ станок 004 (отсутствует 500 часов)»]	[«Заболел работник Иванов (отсутствует 100 часов)», «Вышел из строя ЧПУ станок 001 (отсутствует 200 часов)»]	[«Требуется поменять приоритеты заказов. Заказ 1 и Заказ 2 были отменены. Заказ 3 требуется выполнить в 4 раза быстрее.»]
Примечание	1. Деталь не является Материалом (болванкой) 2. Деталь производится из Материала (болванки)				
Постановка ключевых задач	<p>Ответ на следующие вопросы (также используйте «Базовые и дополнительные варианты принятия решений»):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Успевают ли цех выполнить заказы в срок (требуется произвести расчет исходя из количества часов до выполнения заказа и суммарным количеством времени для производства недостающих деталей)? Если нет, то почему не успевают и надо предпринять действия. 2. Сколько и каких требуется еще произвести деталей, чтобы успеть выполнить все заказы? Пиши конкретно, сколько и каких деталей. 3. Хватает ли материалов (болванок) на складе для производства деталей? Если нет, то надо предпринять действия. Пиши конкретно, сколько и каких материалов (болванок). 4. Требуется ли привлечь дополнительных работников в дополнительную смену для того, чтобы успеть выполнить заказы в срок? <p>Если да, то надо предпринять действия. Пиши конкретно, кого и в какую смену.</p> <p>Тебе требуется писать только конкретные вещи, когда они требуются. Если ничего не требуется предпринимать, то пиши «Штатно.».</p> <p>Свой ответ выдавай по следующему шаблону:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. (ответ); 2. (ответ); ... (...); n. (ответ) 				
Шаблон ответа	<p>Тебе требуется писать только конкретные вещи, когда они требуются. Если ничего не требуется предпринимать, то пиши «Штатно.».</p> <p>Свой ответ выдавай по следующему шаблону:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. (ответ); 2. (ответ); ... (...); n. (ответ) 				

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
Выходные данные и комментарий					
Ответ ГРП	<p>1. Цех не успевает выполнить заказ в срок, так как на данный момент осталось 336 ч до выполнения заказа, а требуется 194 ч на производство недостающих деталей. С учетом неперевиденных ситуаций и возможных проблем необходимо принять действия по оптимизации рабочего процесса.</p> <p>2. Требуется произвести следующие детали:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Корпус: 3 (всего 5, готово 2) – Стойка: 7 (всего 10, готово 3) – Болт: 30 (всего 40, готово 10) – Стакан: 16 (всего 20, готово 4) – Вал: 2 (всего 5, готово 3) – Шпindel: 0 (всего 10, готово 10) – Втулка: 15 (всего 20, готово 5) <p>3. На складе хватает всех необходимых материалов (болванок) для производства деталей. Штатно.</p>	<p>1. Цех не успевает выполнить заказы в срок, так как необходимо произвести 13 деталей, а времени остается только 336 ч. Однако необходимо рассчитать общее время производства недостающих деталей, чтобы определить, требуется ли предпринимать действия.</p> <p>2. Требуется произвести следующие детали:</p> <ul style="list-style-type: none"> Корпус: 3 (всего 5 по заказу – 2 готовых) Стойка: 7 (всего 10 по заказу – 3 готовых) Болт: 30 (всего 40 по заказу – 10 готовых) Стакан: 16 (всего 20 по заказу – 4 готовых) Вал: 2 (всего 5 по заказу – 3 готовых) Шпindel: 0 (всего 10) Втулка: 15 <p>3. Материалов (болванок) на складе хватает для производства деталей.</p> <p>Необходимые материалы следующие:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сталь: 3 Корпуса + 7 Стойка + 2 Вала = 12 (хватает, всего 100 на складе) Сплав Х: 3 Корпуса + 30 Болтов + 2 Вала = 35 (хватает, всего 100 на складе) Медь: 16 Станков + 0 Шпindel + 15 Втулок = 31 (хватает, всего 100 на складе) 	<p>1. Цех не успевает выполнить заказы в срок. Поскольку рабочее время составляет 8 ч в смену, а заказы требуют общего времени 310 ч для завершения (подсчет осложняется отсутствием работников и поломкой станка).</p> <p>2. Необходимо произвести:</p> <ul style="list-style-type: none"> Корпус: 5 штук Стойка: 10 штук Болт: 40 штук Шпindel: 10 штук Втулка: 20 штук Стакан: 20 штук Вал: 5 штук. <p>3. На складе хватает материалов для производства деталей.</p> <p>Остаток:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сталь: 30 (для 10 корпусов и 5 стоек) Сплав Х: 50 (для 40 болтов) Медь: 25 (для 20 стаканов и 10 шпindel) Железо: 60 (для 20 втулок) <p>4. Требуется привлечь дополнительных работников в дополнительную смену. Необходимо пригласить: Работника Заменова для работы на ЧПУ станок 001</p>	<p>1. Цех не успевает выполнить заказы в срок. Заказ 3 теперь нужно выполнить за 40 ч, а необходимо произвести детали: 20 стаканов и 5 валов. Время на их производство составит: $20 * 3 (\text{стакан}) + 5 * 2 (\text{вал}) = 60 \text{ ч}$. При текущем состоянии достижения заказа в 40 ч не может быть выполнено;</p> <p>2. Требуется произвести: 20 стаканов и 5 валов;</p> <p>3. Материалов на складе хватает для производства недостающих деталей. Для 20 стаканов требуются 20 болванок меди, для 5 валов требуется 5 болванок стали или сплав Х. На складе достаточно;</p> <p>4. Дополнительные работники не требуются. Штатно</p>	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
<p>Наблюдение</p>	<p>4. Дополнительно привлечь работников в смену не требуется, так как штатные работники могут справиться с производством в рамках имеющегося времени. Штатно</p>	<p>Шпindelъ: 0 из Меди (есть 20) Втулка: 15 из Меди (есть 20) Для производства Болгов (30) из Сплава Х не хватает 10 болванок (можно закупить). 4. Требуется привлечь дополнительных работников в дополнительную смену (Смена 3) для того, чтобы успеть выполнить заказы в срок. Необходимо привлечь: Бодров Салюттов Заменов Подменов</p>	<p>Железо: 3 Корпуса + 0 Шпindelей + 15 Втулок = 18 (хватает, всего 100 на складе) 4. Да, требуется привлечь дополнительных работников в дополнительную смену (Смена 3) для того, чтобы успеть выполнить заказы в срок. Необходимо привлечь: Бодров Салюттов Заменов Подменов</p>	<p>Работника Подменова для работы на ЧПУ станок 002</p>	<p>В целом ИИ работает нормально, но опять считает, что заказы в срок не получаются выполнить</p>
<p>Наблюдение</p>	<p>Для первого кейса были даны данные, которые не требуют перепланирования на производстве. Но модель посчитала, что требуется предпринимать какие-нибудь действия. Парадоксально то, что по другим пунктам она ответила все верно. Скорее всего надо описывать промт более подробно, а также раздробить на много подпромиттов и результаты каждого подпромитта агрегировать во что-то итоговое результирующие</p>	<p>В этом кейсе было рассмотрено состояние, когда не хватает материалов для производства. Языковая модель опять ошиблась в 1 пункте, а также ошиблась и в 3 пункте, так как Меди не хватает на самом деле, но модель почему-то посчитала потребности в материалах по отдельности для каждой детали (что является неверным). На удивление, модель решила вызвать в дополнительную смену двух работников, но не понятно с какой целью. Возможно, она посчитала, что придется ждать новые детали, и время, в которое можно было их производить, надо как-то компенсировать доп. сменой</p>	<p>В данной симуляции были добавлены Критичные изменения, которые напрямую влияют на производственный план цеха. Опять были допущены банальные ошибки в математике, но стоит признать, что языковая модель решила вызвать в дополнительную смену сотрудников, чтобы, видимо, наверстать потенциальное отставание от графика</p>	<p>В данном кейсе разбиты заказы и были критичные изменения. Модель довольно-таки хорошо восприняла сложную ситуацию и дала почти корректный ответ. Она ошиблась в двух местах: 1. Цех успеет все сделать в срок, но модель так не считает, так как она не понимает, что время нужно считать параллельно на всех станках, а модель просто суммирует время производства каждой детали. 2. Количество материалов на самом деле не хватает, а именно 5 меди. 3. Еще почему-то станок стал материалом, что очень удивительно. Помимо прошлых рекомендаций, также можно попробовать построить полноценную симуляцию производства для проверки еще одной гипотезы. Если получится построить симуляцию, то можно будет решить полноценно задачу планирования производства с помощью генетических алгоритмов</p>	<p>В целом ИИ работает нормально, но опять считает, что заказы в срок не получаются выполнить</p>

В исследовании был сформирован шаблонный промпт (от англ. *prompt* – запрос, подсказка) для языковой модели, а также генератор промптов, который принимает различные переменные (изменения или состояния) и на выходе дает небольшой отчет с данными кейса. Подготовлен список кейсов, которые задают различные состояния и поведения, таким образом исследование становится объективнее. Через генератор промптов были пропущены все кейсы, полученные исходные промпты были предоставлены языковой модели. Языковая модель выдала ответы на каждый промпт, результаты ответов LLM приведены в табл. 1.

С учетом проведенного исследования применения MES/APS в качестве цифрового помощника авторы столкнулись с рядом вызовов, таких как:

- 1) **сложность разработки:** разработка алгоритмов для MES/APS-системы является сложной задачей, требующей глубоких знаний в области математики, статистики и программирования;
- 2) **необходимость обучения:** MES/APS-система требует обучения на больших объемах данных, что может быть затруднительно в условиях производства;
- 3) **этические аспекты:** применение MES/APS в производстве может вызвать этические вопросы, связанные с безопасностью и конфиденциальностью данных.

Заключение

Применение искусственного интеллекта в виде языковых моделей в MES/APS-системах представляет собой перспективное направление, способное повысить эффективность производства и оптимизировать производственные процессы. Одним из перспективных применений MES/APS-систем является создание цифрового помощника диспетчера, который может значительно автоматизировать работу диспетчера, повысив эффективность производства за счет подготовки вариантов решений на основе полученных данных из различных информационных систем предприятия, включая ERP, IIoT, АСУ ТП, SCADA, MDC. Однако для успешного применения MES/APS в качестве цифрового помощника необходимо преодолеть ряд вызовов, связанных с разработкой алгоритмов, обучением системы и этическими аспектами. В будущем ожидается дальнейшее развитие технологий MES/APS и их применение в качестве цифровых помощников диспетчеров, что позволит создать интеллектуальные системы, способные адаптироваться к изменяющимся условиям производства и оптимизировать производственные процессы.

Список литературы

1. Александров В. Р., Щеткин А. А., Борисов А. А. [и др.]. Искусственный интеллект в задачах планирования производства // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 196–208.
2. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II. СПб. : Питер, 2008. 416 с.
3. Гайфуллин Б. Н., Обухов И. А. Автоматизация систем управления предприятиями стандарта ERP/MRP II. М. : Богородский печатник, 2000. 104 с.
4. Питеркин С. В., Оладов Н. А., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. М. : Альпина Паблишерз, 2010. 368 с.
5. Шваб К. Четвертая промышленная революция : пер. с англ. М. : Эксмо, 2023. 208 с.
6. Особенности планирования производственных ресурсов, стратегия MRP II. URL: <https://iaas-saaspraas.ru/rating/ibp/ibp-in-hse/strategiyamrpii/>
7. Платформа промышленного интернета вещей. URL: <https://istokmw.ru/iiot/>
8. Российский рынок IoT и анализ технологических IoT-платформ для перспективных рынков : пресс релиз. URL: <https://avtprom.ru/news/2016/02/15/rossiiskii-rynok-iiot-i-a>
9. Industrial Internet of Things – IIoT. Промышленный интернет вещей. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Industrial_Internet_of_Things_-_IIoT_\(промышленный_интернет_вещей\)_в_России](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Industrial_Internet_of_Things_-_IIoT_(промышленный_интернет_вещей)_в_России)

References

1. Aleksandrov V.R., Shchetkin A.A., Borisov A.A. et al. Artificial intelligence in production planning tasks. *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii = Infocommunication and radioelectronic technologies*. 2022;5(2):196–208. (In Russ.)
2. Gavrilov D.A. *Upravlenie proizvodstvom na baze standartar MRP II = Production management based on the MRP II standard*. Saint Petersburg: Piter, 2008:416. (In Russ.)
3. Gayfullin B.N., Obukhov I.A. *Avtomatizatsiya sistem upravleniya predpriyatiyami standartar ERP/MRP II = Automation of enterprise management systems of the ERP/MRP II standard*. Moscow: Bogorodskiy pechatnik, 2000:104. (In Russ.)

4. Piterkin S.V., Oladov N.A., Isaev D.V. *Tochno vovremya dlya Rossii. Praktika primeneniya ERP-sistem = Just in time for Russia. The practice of using ERP systems.* Moscow: Al'pina Pablisherz, 2010:368. (In Russ.)
5. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya: per. s angl. = The Fourth Industrial Revolution : translated from English.* Moscow: Eksmo, 2023:208. (In Russ.)
6. *Osobennosti planirovaniya proizvodstvennykh resursov, strategiya MRP II = Features of production resource planning, MRP strategy II.* (In Russ.). Available at: <https://iaassaaspaas.ru/rating/ibp/ibp-in-hse/strategiyamrpii/>
7. *Platforma promyshlennogo interneta veshchey = The industrial Internet of Things platform.* (In Russ.). Available at: <https://istokmw.ru/iiot/>
8. *Rossiyskiy rynek IoT i analiz tekhnologicheskikh IoT-platform dlya perspektivnykh rynkov: press reliz = The Russian IoT market and the analysis of technological IoT platforms for promising markets : press release.* (In Russ.). Available at: <https://avtprom.ru/news/2016/02/15/rossiiskii-rynok-iot-i-a>
9. *Industrial Internet of Things – IIoT. Promyshlenny internet veshchey = Industrial Internet of Things.* (In Russ.). Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Industrial_Internet_of_Things_-_IIoT_\(promyshlenny_internet_veshchey\)_v_Rossii](https://www.tadviser.ru/index.php/Stat'ya:Industrial_Internet_of_Things_-_IIoT_(promyshlenny_internet_veshchey)_v_Rossii)

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Романович Александров

директор по цифровой трансформации,
Научно-производственное предприятие
«Исток имени А. И. Шокина»
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: vr Aleksandrov@istokmw.ru

Vitaly R. Aleksandrov

Director of digital transformation,
Research and Production Enterprise
"Istok named after A.I. Shokin"
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Алексей Алексеевич Щеткин

начальник отдела,
Научно-производственное предприятие
«Исток имени А. И. Шокина»
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: aaschetkin@istokmw.ru

Aleksey A. Shchetkin

Head of the department,
Research and Production Enterprise
"Istok named after A.I. Shokin"
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

Александр Сергеевич Бевз

программист,
Научно-производственное предприятие
«Исток имени А. И. Шокина»
(Россия, Московская обл., г. Фрязино,
ул. Вокзальная, 2а)
E-mail: asbevz@istokmw.ru

Aleksandr S. Bevz

Programmer,
Research and Production Enterprise
"Istok named after A.I. Shokin"
(2a Vokzalnaya street, Fryazino,
Moscow region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 19.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 13.01.2025

Принята к публикации/Accepted 05.02.2025

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 681.3

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

ИМПУЛЬСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ ВРЕМЕНИ ПЕРЕЗАРЯДА МДП-СТРУКТУРЫ

Ф. А. Бобылев¹, Д. А. Ташлинцев², В. М. Чайковский³

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

^{1,2} radiolokaci@yandex.ru, ³ rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Задача выпуска быстродействующих полупроводниковых элементов неразрывно связана с применением МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник), используемых в качестве основы для данных элементов, обладающих слабо выраженными релаксационными свойствами. *Материалы и методы.* Для измерения постоянной времени экспоненциальной составляющей импульсного напряжения используется метод «двух засечек», реализуемый с помощью управляемого аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав микроконтроллера (МК). Текущие выборки, кроме самой первой, амплитуды напряжения экспоненциальной формы, получаемые на выходе аналого-цифрового преобразователя, после масштабирования с коэффициентом 2,72, сравниваются схемой совпадения кодов (ССК) с результатом первоначальной выборки. При совпадении сравниваемых кодов ССК формирует сигнал единичного уровня, переводящий триггер в нулевое состояние, находящийся до этого в единичном состоянии под воздействием сигнала первой выборки. В результате чего на выходе триггера будет сформирован интервал времени, равный по значению постоянной времени экспоненциального напряжения. *Результаты.* Построение измерителя на базе МК позволяет реализовать достаточно универсальный измеритель времени перезаряда МДП-структуры, напряжение реакции которой на внешнее импульсное воздействие будет иметь в своем составе экспоненциальную составляющую не спадающего вида, а нарастающего. Здесь также следует использовать метод «двух засечек», но при этом уже требуется рассматривать отношение последующей выборки амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения к первоначальной выборке. *Выводы.* Использование в измерителе МК, содержащего в составе управляемый аналого-цифровой преобразователь, осуществляющий операции выборки через заданные промежутки времени, за счет уменьшения значения последних может осуществлять оценку значения постоянной времени экспоненциальной составляющей напряжения реакции МДП-структуры на внешнее воздействие, а значит, оценивать релаксационные свойства последней с высокой точностью.

Ключевые слова: МДП-структура, микроконтроллер, релаксационные свойства, схема совпадения кодов, управляемый аналого-цифровой преобразователь, выборка, триггер

Для цитирования: Бобылев Ф. А., Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Импульсный измеритель на микроконтроллере времени перезаряда МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 46–52. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

PULSE METER ON THE MICROCONTROLLER OF THE RECHARGE TIME OF THE TIR STRUCTURE

F.A. Bobylev¹, D.A. Tashlintsev², V.M. Chaykovskiy³

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

^{1,2} radiolokaci@yandex.ru, ³ rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The task of producing high-speed semiconductor elements is inextricably linked with the use of MD structures used as the basis for these elements with weakly pronounced relaxation properties. *Materials and methods.* To measure the time constant of the exponential component of the pulse voltage, the «two-serif» method is used, implemented using a controlled ADC included in the microcontroller (MC). The current samples, except for the very first one, are the exponential voltage amplitudes obtained at the ADC output, after scaling by a factor of 2.72, the code matching scheme (CSC) is compared with the result of the initial sample. When the compared codes coincide, the SSC generates a single-level signal, which converts the trigger (Tg) to the zero state, which was previously in a single state under the influence of the signal of the first sample. As a result, a time interval equal in value to the time constant of the exponential voltage will be formed at the output of the Tg. *Results.* The construction of a meter based on MK makes it possible to implement a fairly universal meter of the recharge time of the TIR structure, the reaction voltage of which to an external impulse action will have an exponential component in its composition, not of a decreasing type, but of an established one. The «two-serif» method should also be used here, but it is already necessary to consider the ratio of the subsequent sampling of the amplitude of the exponential component of the input voltage to the initial sample. *Conclusions.* The use of an MC in a meter containing a controlled ADC that performs sampling operations at specified time intervals, by reducing the value of the latter, can estimate the value of the time constant of the exponential component of the stress of the reaction of the TIR structure to external influences, and therefore evaluate the relaxation properties of the latter, with high accuracy.

Keywords: TIR structure, microcontroller, relaxation properties, code matching scheme, controlled ADC, sampling, trigger

For citation: Bobylev F.A., Tashlintsev D.A., Chaykovskiy V.M. Pulse meter on the microcontroller of the recharge time of the tir structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):46–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-6

Введение

В ходе исследования электрофизических свойств МДП-структур (рис. 1, а) одними из важнейших ее параметров, определяющими частотные свойства различных элементов, изготавливаемых на базе данной структуры, являются ее релаксационные свойства, проявляемые структурой в области ее пространственного заряда, поэтому оценка данных свойств весьма важна и имеет огромное значение при разработке технологии производства элементов полупроводниковой техники. В свою очередь, эти свойства определяются скоростью перезаряда в данной области поверхностных состояний полупроводниковой части структуры. При этом скорость процесса перезаряда, по сути, является постоянной времени $\tau = RC_2$ перезаряда всей МДП-структуры, строение которой и ее эквивалентная схема соответственно приведены на рис. 1, а, б [1, 2].

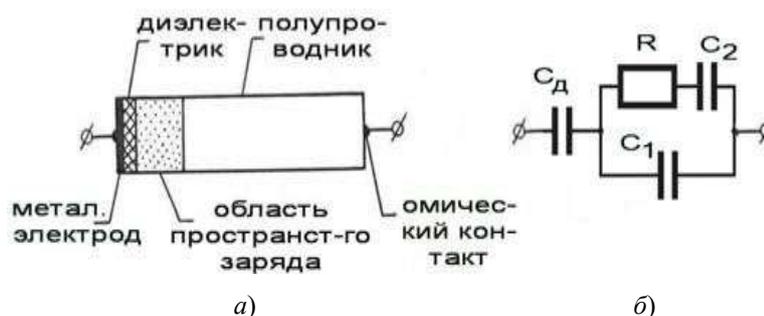


Рис. 1. Скорость процесса перезаряда:
а – МДП-структура; б – эквивалентная схема

Согласно строению структуры ее эквивалентная схема непременно должна иметь емкости C_d и C_1 , обусловленные как диэлектрическим слоем, так и полупроводниковым, а также R , C_2 характеризующие релаксационные свойства области пространственного заряда структуры.

Методика оценки параметров МДП-структуры к настоящему времени достаточно хорошо развита [3], причем с более углубленной оценкой значений характерных свойств структуры. Достигается это тем, что реакция последней на внешнее воздействие измерительным сигналом в виде скачка напряжения отображается усложненной эквивалентной схемой, более подробно отражающей те или иные свойства структуры. Работа устройств, предложенных и подробно рассмотренных в работе [3], в основном базируется на использовании ряда аналоговых операций над сигналом реакции МДП-структуры, помещенной в измерительную схему (ИС), на сигнал внешнего импульсного воздействия, что позволяет по значению постоянной времени переходного процесса в ИС судить о релаксационных свойствах МДП-структуры.

Предлагается оценку времени релаксации области пространственного заряда структуры осуществлять с помощью импульсного измерителя, реализованного на базе микроконтроллера МК.

Постановка задачи

В основе предлагаемого импульсного измерителя лежит один из приемов инвариантного измерения параметров электрических цепей, когда каждому параметру цепи соответствует амплитуда той или иной составляющей сложного импульсного напряжения [4]. Метод «двух засечек» был предложен А. И. Мартяшиным и был хорошо развит в различных работах многочисленных учеников его научной школы. Суть метода заключается в том, что выходное напряжение ИС в зависимости от характера ее построения будет иметь в своем составе импульсную составляющую в виде спадающей экспоненты (рис. 2), являющейся входным напряжением измерителя $U_{вх}(t)$, и как только отношение амплитуд, сделанных двух выборок экспоненциального напряжения, совпадет со значением основания натурального логарифма $e = 2,72$, то длительность интервала времени между моментами производства данных выборок входного напряжения, считается равной значению постоянной времени экспоненциальной составляющей входного напряжения.

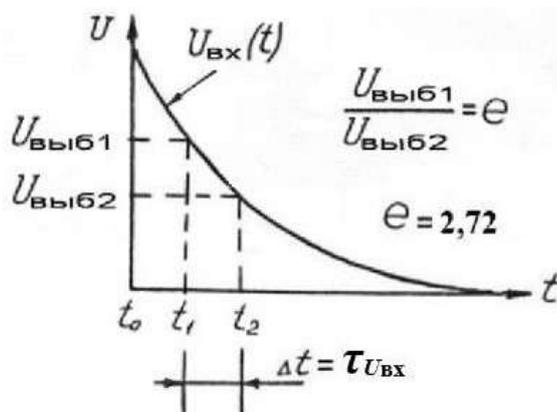


Рис. 2. Вид спадающей экспоненты

Теперь вся задача сводится к организации у напряжения $U_{вх}(t)$ этих двух выборок, особенно последующих после первой, которые следует проводить до тех пор, пока отношение амплитуды первой выборки к амплитуде последующей не станет равняться основанию натурального логарифма, с последующей подачей на выход интервала времени, получившегося между моментами проведения этих выборок и формируемого триггером.

Решение задачи

Для упрощения решения данной задачи предлагается значение амплитуды каждой выборки, последующей за первой и представляющей собой кодовую комбинацию, пропускать через масштабный преобразователь, умножающий данное кодовое представление амплитуды напряжения выборки на коэффициент 2,72. Необходимо подчеркнуть, что начало измерения происходит по отношению момента времени t_0 с неким запаздыванием, специально устанавливаемым программным путем и равным 0,5 мкс. Затем полученный результат в виде измененной кодовой последовательности поступает на один из входов схемы сравнения кодов, на другой вход которой постоянно поступает кодовая комбинация с выхода аналого-цифрового преобразователя (АЦП), получаемая после обработки амплитуды первой выборки входного напряжения. Как только схема сравнения кодов зафиксирует момент их равенства, она сформирует сигнал, меняющий состояние триггера на противоположное, находящегося под действием сигнала первой выборки входного напряжения в единичном состоянии. Данное изменение состояний триггера формирует на выходе интервал времени, равный значению постоянной времени входного напряжения $U_{вх}(t)$, определяемого релаксационными свойствами МДП-структуры.

Следует заметить, что в зависимости от характера построения ИС, в которой осуществляется воздействие импульсным сигналом на МДП-структуру, реакция последней может иметь вид как спадающей экспоненты вида $U_{вх}(t) = U_0 e^{-t/\tau}$ (рис. 2), так и возрастающей экспоненты вида $U_{вх}(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau})$ (рис. 3) [3].

При этом характер работы измерителя, согласно ранее описанному алгоритму, немного изменится, а именно: ССК уже будет сравнивать кодовую комбинацию значения последующей выборки амплитуды входного напряжения с кодовой комбинацией первой выборки (рис. 3), прошедшей через масштабный преобразователь, масштабирующий данное кодовое представление амплитуды напряжения выборки на коэффициент 2,72, а остальная работа измерителя не меняется. Данное изменение алгоритма работы измерителя происходит путем перевода переключателя (П) из одного положения в другое, а именно: из положения «Спад.» в положение «Возр.» либо наоборот.

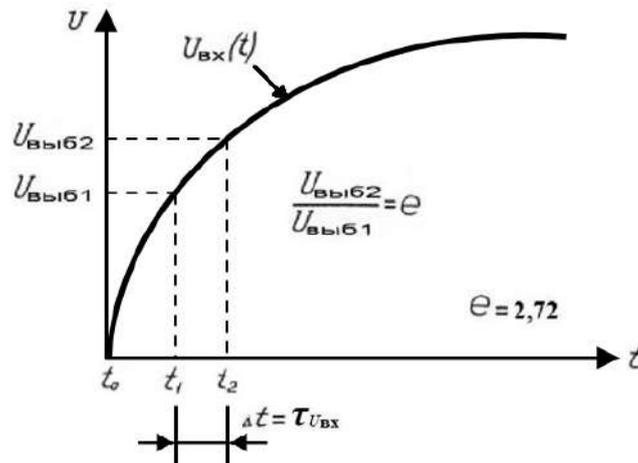


Рис. 3. Вид возрастающей экспоненты

На рис. 4 приведена структура алгоритма работы микроконтроллера, реализующего описанную выше методику, а на рис. 5 – принципиальная электрическая схема измерителя.

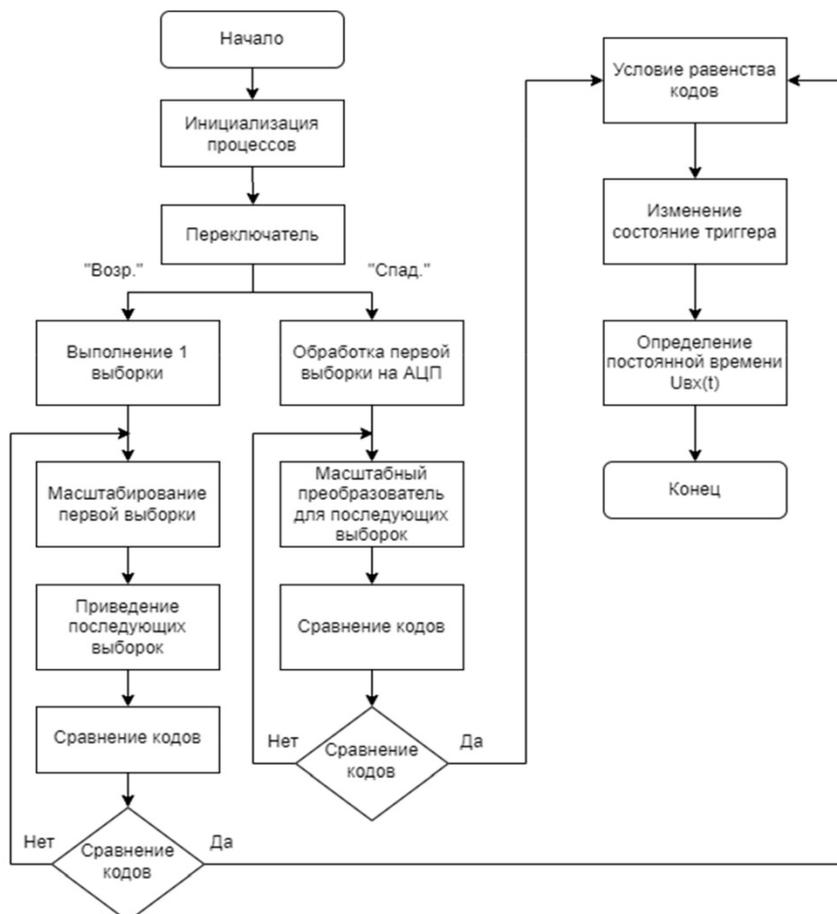


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы измерителя

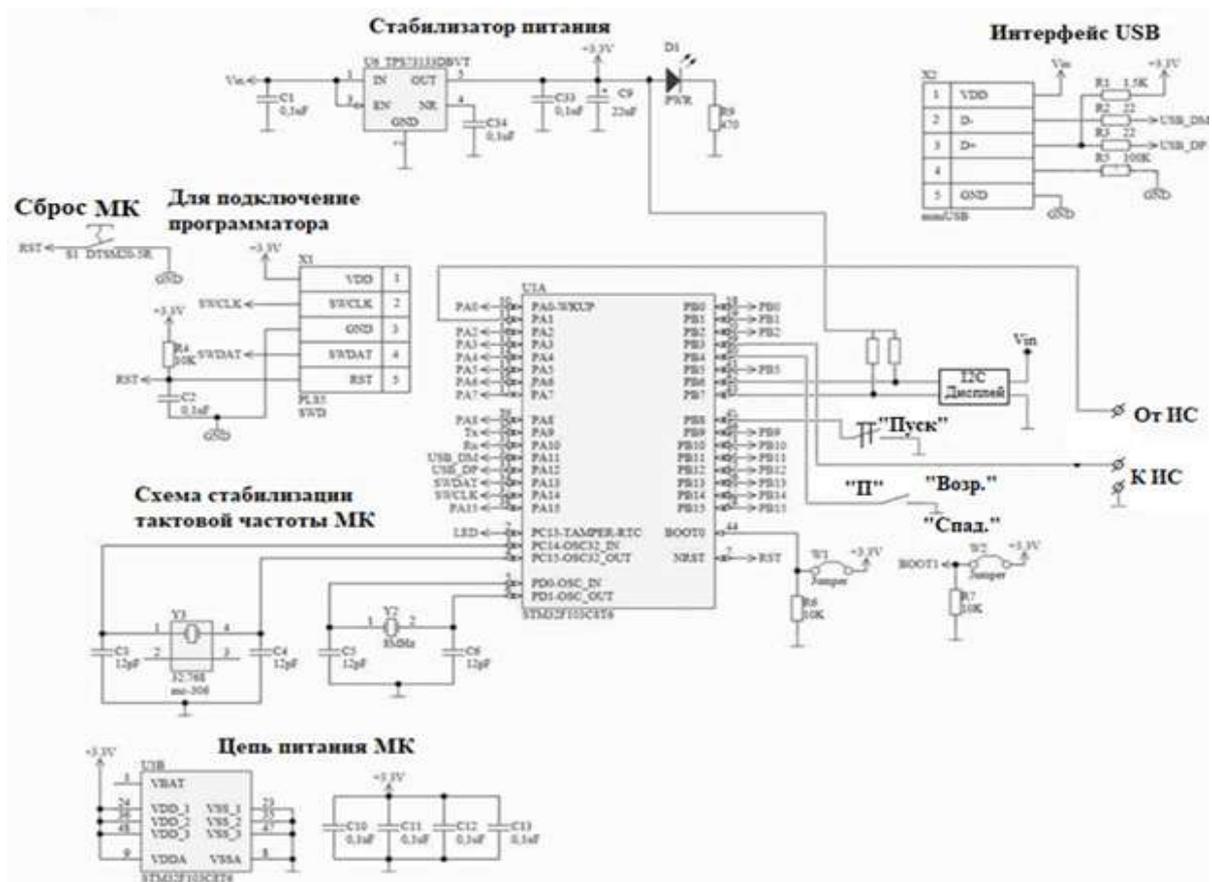


Рис. 5. Принципиальная схема измерителя

Функционирование алгоритма происходит следующим образом.

На предварительном этапе при помощи программатора ST-Link v2 [5] осуществляется занесение (прошивка) в память МК программы его работы. В зависимости от вида напряжения $U_{вх}(t)$ переключатель П устанавливается оператором в соответствующее положение «Спад.» либо «Возр.».

Далее микроконтроллер инициализирует параметры для измерения, такие как начальные состояния триггеров, настройки АЦП и тактирование.

Алгоритм работы в режиме «Спад.»

Проводится первая выборка амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения и перевод им триггера в единичное состояние, с дальнейшей подачей на один из входов ССК кодовой комбинации, сформированной АЦП из данной выборки.

Каждая последующая выборка амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения, осуществляемая АЦП, масштабируется с коэффициентом 2,72, и уже в виде кодовой комбинации подается на другой вход ССК.

ССК осуществляет сравнение кодовых комбинаций промасштабированных выборок с кодовой комбинацией первой выборки. Если комбинации не совпадают, процесс выборок продолжается; если совпадают, то ССК формирует сигнал единичного уровня, который переводит триггер в нулевое состояние, тем самым на выходе последнего формируется временной интервал, значение которого в виде окончательной оцифровки выводится на дисплей, что свидетельствует об окончании процесса измерения.

Алгоритм работы в режиме «Возр.»

Проведение первой выборки амплитуды входного напряжения, установка триггера в единичное состояние, амплитуда данной выборки масштабируется с коэффициентом 2,72 и в виде сформированной АЦП кодовой комбинации поступает на один из входов ССК.

АЦП производит дальнейшие выборки амплитуды экспоненциальной составляющей входного напряжения, и в виде сформированной АЦП кодовой комбинации каждой из них они поступают на другой вход ССК.

Срабатывание ССК и вся дальнейшая работа происходят аналогично режиму «Спад.».

Описание принципиальной схемы измерителя

Практическая реализация описанного метода измерения постоянной времени МДП-структуры осуществляется на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 [6, 7], который является одним из самых широко распространенных в своем классе, широко используемым в различных приложениях, особенно при измерении и обработке сигналов. Он также оснащен встроенными аналогово-цифровыми преобразователями с высоким разрешением (12 бит), что делает его подходящим для задач, связанных с обработкой аналоговых сигналов, для четкой работы МК в плане стабилизации его тактовой частоты и увеличения точности оценки периодов времени. МК снабжен двумя кварцевыми резонаторами HC-49SM и MC-306 соответственно на 8 и 32 МГц. Для связи с персональным компьютером используется интерфейс USB, через который также плата питается напряжением 5В. На плате имеется интерфейс программирования отладки SDIO/JTAG, к которому подключается программатор ST-Link v2 [5]. Кнопка «Сброс» осуществляет сброс (перезагрузку) МК. Для питания МК используется стабилизатор напряжения 3.3 В, реализованный на базе микросхемы TPS73133DBVT. Для подключения к входам/выходам МК используются выводы GPIO. О начале работы измерителя свидетельствует свечение светодиода VD1 типа SMD 0402.

Маркировка разъемов PA0-PA15, PB0-PB15, предназначенных для подключения GPIO сделана в соответствии с маркировкой выводов, приведенной в документацию на используемый МК. С вывода PB4 на ИС подается импульсный сигнал прямоугольной формы «малой амплитуды», действующий на МДП-структуру, находящуюся в составе ИС. Осуществляемые встроенным АЦП выборки выходного напряжения ИС МК снимает с вывода PA1. К выводу PB8 подключена кнопка, при нажатии которой начинается процесс измерения. Для изменения характера алгоритма измерения к выводу PB3 подключен переключатель «П», от нахождения которого соответственно в положении «Спад.» или «Возр.» будет меняться логический уровень (ноль или единица) на данном входе, что приведет к выбору нужной программы обработки сигнала с выхода ИС, а следовательно, и метода измерения времени релаксации МДП-структуры. Выводы PB6 и PB7 работают на шину I2C, по которой для отображения полученного результата оценки значения $\tau U_{\text{вх}}$ он выводится на дисплей SSD1306.

Заключение

Построение измерителя на базе микроконтроллера позволяет при достаточно незначительных размерах, ограниченных буквально одной типовой платой, и сравнительно ограниченном количестве доступных элементов получить универсальный измеритель, который позволяет оценить релаксационные свойства МДП-структуры, реакция которой на импульсное воздействие в зависимости от построения ИС может иметь характер как спадающей, так и возрастающей экспоненты.

Список литературы

1. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / пер с англ. под ред. Р. А. Суриса. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
2. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
3. Чайковский В. М. Измерители параметров МДП-структур на несинусоидальном токе : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1996. 222 с.
4. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
5. User manual: ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm
6. STM32F103C8T6 Reference manual. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
7. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVR. М., 2006. 273 с.

References

1. Zi S.M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov / per s angl. pod red. R.A. Surisa: v 2 kn. = Physics of semiconductor devices / translated from English. edited by R. A. Suris : in 2 books.* Moscow: Mir, 1984;Bk.1:456. (In Russ.)
2. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : textbook.* Moscow, 2005:492. (In Russ.)
3. Chaykovskiy V.M. *Meters of parameters of MDP structures on non-sinusoidal current.* PhD dissertation. Penza, 1996:222. (In Russ.)
4. Mart'yashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Converters of electrical parameters for monitoring and measurement systems.* Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)
5. *User manual: ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32.* Available at: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00026748-stlinkv2-incircuit-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stm
6. *STM32F103C8T6 Reference manual.* Available at: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
7. Morton Dzh. *Mikrokontrollery AVP = AVR microcontrollers.* Moscow, 2006:273. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Федор Алексеевич Бобылев

инженер-электронщик кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

Fedor A. Bobylev

Electronics engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Александрович Ташлинцев

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

Dmitry A. Tashlintsev

Engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук,
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 of the 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 25.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 14.10.2024

Принята к публикации / Accepted 18.11.2024

УДК 681.586.2
doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ

Г. А. Ануар¹, А. А. Трофимов², И. М. Рыбаков³, С. А. Бростилов⁴

¹ Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

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

¹ galym_rma@mail.ru, ² alex.t1978@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ ser-brostilov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Электроника, информационные технологии, управление, приборная автоматика, средства обработки и хранения информации, телекоммуникации стали технической базой высоких технологий. Вооруженность этими средствами, полнота их использования определяют облик современного общества. Отдельно в этом ряду стоят системы управления аэрокосмическими объектами, где к общим проблемам развития электроники добавляются увеличенная плотность компоновки в сочетании с большим быстродействием и увеличенной функциональностью, повышенная надежность в условиях экстремальных внешних воздействий. Эти дополнительные требования обусловили индивидуальные черты развития производства электроники и в основополагающей его составной части – датчиковой аппаратуры. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов испытаний. *Результаты.* В результате моделирования были получены эпюры полей распределения температур при критических температурах с целью исследования влияния данных условий на входящие в состав исследуемого объекта детали.

Ключевые слова: датчики физических величин, имитационное моделирование

Для цитирования: Ануар Г. А., Трофимов А. А., Рыбаков И. М., Бростилов С. А. Определение амплитуды резонансных частот датчика температуры при воздействии синусоидальной вибрации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 53–58. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-7

DETERMINATION AMPLITUDE RESONANT FREQUENCIES TEMPERATURE SENSOR UNDER ACTION OF SINUSOIDAL VIBRATION

G.A. Anuar¹, A.A. Trofimov², I.M. Rybakov³, S.A. Brostilov⁴

¹ Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

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

¹ galym_rma@mail.ru, ² alex.t1978@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru, ⁴ ser-brostilov@yandex.ru

Abstract. *Background.* Electronics, information technology, control, instrumentation, information processing and storage, telecommunications have become the technical base of high technologies. The armament of these means, the completeness of their use determines the appearance modern society. Separately in this row are aerospace object control systems, where increased layout density in combination with high speed and increased functionality, increased reliability in conditions of extreme external influences are added to the general problems electronics development. These additional requirements determined the individual features of the development electronics production and in its fundamental part – sensor equipment. *Materials and methods.* As a research method, simulation modeling was used, in which the studied sensor is replaced by its model, with which experiments are carried out in order to obtain information about this object. The experiment used specialized Solidworks software to avoid expensive and lengthy test cycles. *Results.* As a result of modeling, diagrams of temperature distribution fields at critical temperatures were obtained in order to study the effect of these conditions on the parts included in the studied object.

Keywords: physical quantity sensors, simulation modeling

For citation: Anuar G.A., Trofimov A.A., Rybakov I.M., Brostilov S.A. Determination amplitude resonant frequencies temperature sensor under action of sinusoidal vibration. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):53–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-7

Современные датчики физических величин (давления, температуры, перемещений и др.), применяемые в изделиях ракетно-космической техники и наземных космических инфраструктурах, представляют собой сложные многокомпонентные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы (тепловые, механические, упругие и термоупругие, электрические, оптические и др.). Основой и ответственной составляющей датчиков физических величин являются чувствительные и воспринимающие элементы. В связи с этим становится актуальным исследование воздействия механических и упругих переходных процессов на чувствительные элементы датчиковой аппаратуры. Механические и упругие переходные процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики, как долговечность, надежность, время готовности и в конечном итоге эффективность их работы. Для ускорения разработки датчиковой аппаратуры необходимо уже на этапе проектирования, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям, знать влияние реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика. При использовании имитационного моделирования становится возможным комбинирование различных начальных условий эксплуатации, материалов и временных характеристик воздействия возмущающих факторов, в том числе синусоидальной вибрации [1, 2].

Целью проведения имитационного моделирования является определение изменения амплитуды резонансных частот конструкции датчика температуры.

В процессе моделирования определяются амплитуды колебаний при воздействии виброускорений в зависимости от типа крепления датчика (горизонтально или вертикально). Имитационное моделирование проводилось с применением программы ANSYS.

Для проведения имитационного моделирования построены две твердотельные 3D-модели сборки датчиков с приспособлением в горизонтальном и вертикальном положении. Расчетные модели и схема граничных условий представлены на рис. 1.

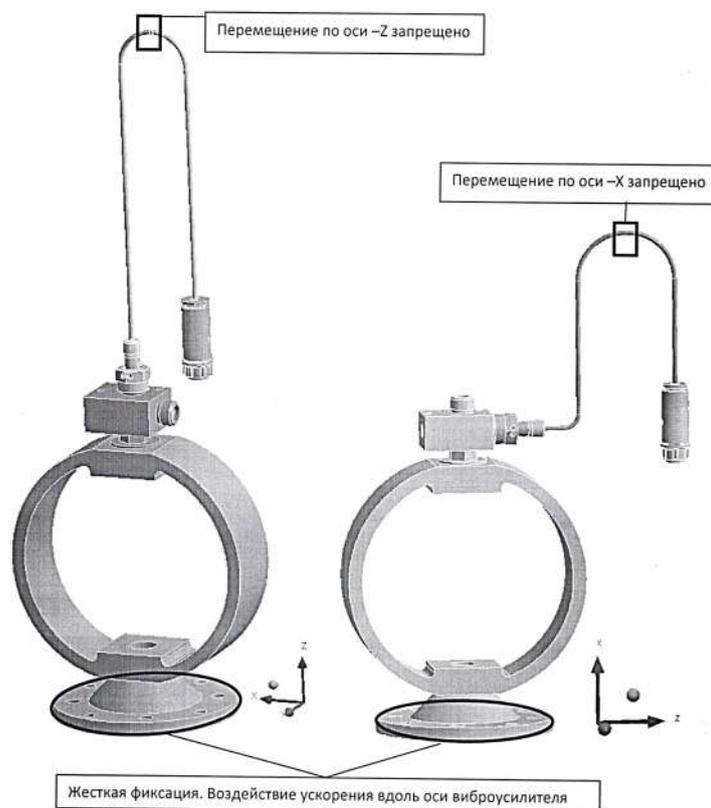


Рис. 1. Твердотельные расчетные модели и схема граничных условий

Физико-механические характеристики используемых при расчете материалов представлены в табл. 1.

В результате гармонического анализа в программном комплексе ANSYS определены зависимости амплитуды виброускорения в зависимости от частоты. Результаты моделирования представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов

Материал	Характеристики		
	Модуль упругости, Па	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Сталь 45	$2,04 \cdot 10^{11}$	7826	0,3
Клей ВК9	$6 \cdot 10^7$	1200	0,2
Д16	$6,9 \cdot 10^{10}$	2780	0,33
30ХГСА	$2,15 \cdot 10^{11}$	7850	0,3
12Х18Н10Т	$2,814 \cdot 10^{11}$	7920	0,3
Медь	$1,1 \cdot 10^{11}$	8300	0,34

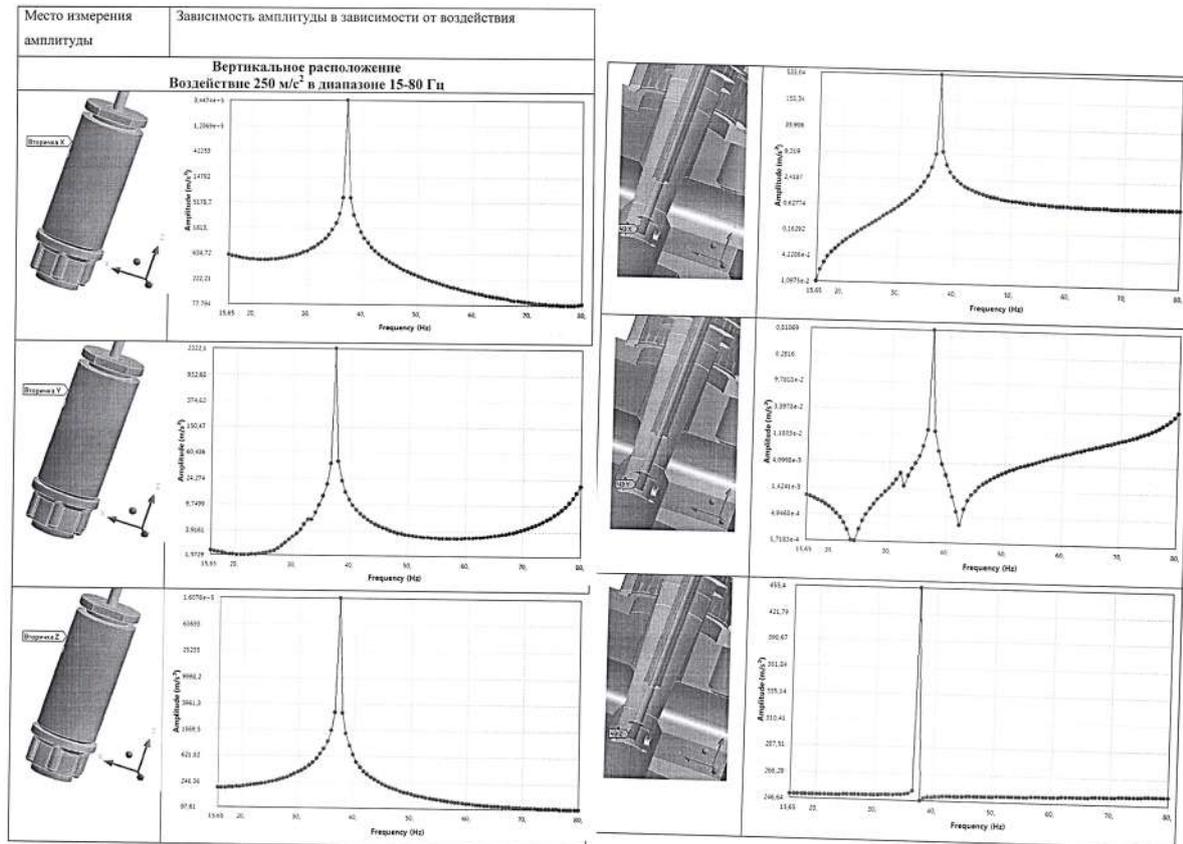


Рис. 2. Внешний вид и графики зависимости частоты от амплитуды при воздействии ускорения 250 м/с^2

Согласно рис. 2 следует, что в области разъема при ускорении вдоль оси x максимальное значение амплитуды составляет $3,4 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$, вдоль оси y максимальное ускорение составляет 2322 м/с^2 , а вдоль оси z максимальное ускорение составляет $1,6 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$. В свою очередь в области чувствительного элемента при ускорении вдоль оси x максимальное значение амплитуды составляет 533 м/с^2 , вдоль оси y максимальное ускорение составляет $0,81 \text{ м/с}^2$, а вдоль оси z максимальное ускорение составляет 455 м/с^2 . Обобщив результаты моделирования, сделаем вывод о корректности и адекватности полученных данных. Так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии ускорения 250 м/с^2 не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции [3–5].

Согласно рис. 3 следует, что в области разъема при ускорении вдоль оси x максимальное значение амплитуды составляет $1,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$, вдоль оси y максимальное ускорение составляет $1 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$, а вдоль оси z максимальное ускорение составляет $1,3 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$. В свою очередь в области чувствительного элемента при ускорении вдоль оси x максимальное значение амплитуды составляет 18186 м/с^2 , вдоль оси y максимальное ускорение составляет 6190 м/с^2 , а вдоль оси z максимальное ускорение составляет $93\,562 \text{ м/с}^2$. Обобщив результаты моделирования,

сделаем вывод о корректности и адекватности полученных данных. Так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии ускорения 1000 м/с^2 не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции.

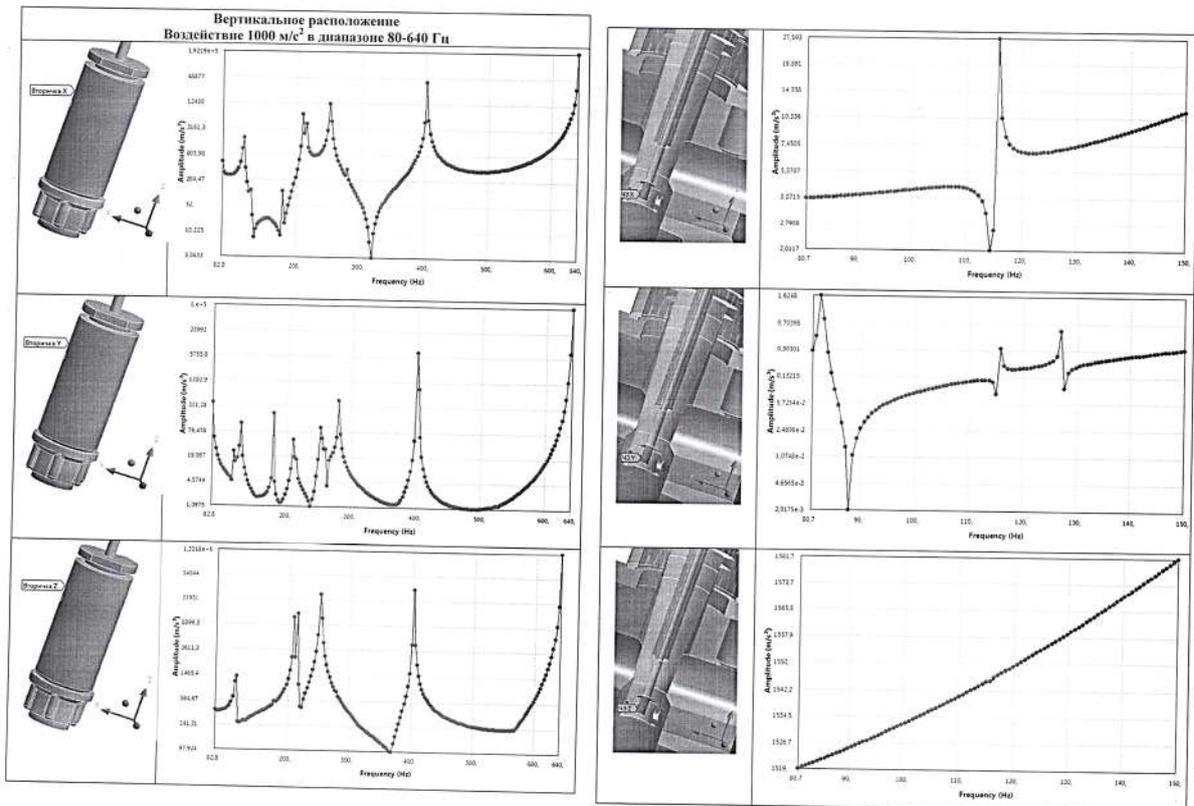


Рис. 3. Внешний вид и графики зависимости частоты от амплитуды при воздействии ускорения 1000 м/с^2

Заключение

В результате моделирования воздействия ускорения вдоль оси виброусилителя на датчик температуры определены изменения амплитуды виброускорения в зависимости от амплитуды. Моделирование показало корректность и адекватность полученных данных, так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии заданного ускорения не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции [6, 7].

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
2. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование тензорезисторного датчика избыточных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 56–63.
3. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
4. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
5. Рязанцев Д. А., Тимонин Р. М., Трофимов А. А. Имитационное моделирование датчика температуры // Датчики и системы. 2019. № 6. С. 11–14.
6. Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Дерябин Д. В. [и др.]. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 54–61.
7. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.

References

1. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
2. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a tensoresistor overpressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):56–63. (In Russ.)
3. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)
4. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
5. Ryazantsev D.A., Timonin R.M., Trofimov A.A. Simulation modeling of a temperature sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2019;(6):11–14. (In Russ.)
6. Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Deryabin D.V. et al. Designing a temperature sensor by simulation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):54–61. (In Russ.)
7. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Галымжан Амандыкович Ануар

старший преподаватель кафедры космической
техники и технологии,
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)
E-mail: galym_rma@mail.ru

Galymzhan A. Anuar

Senior lecturer of the sub-department
of space engineering and technology,
Gumilyov Eurasian National University
(2 Satpayev street, Astana, Kazakhstan)

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: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov

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

Илья Михайлович Рыбаков

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rybakov_im@mail.ru

Илья М. Rybakov

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of design and production
of radio equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Бростилов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ser-brostilov@yandex.ru

Sergey A. Brostilov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of design and production of radio equipment,
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 26.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2024

Принята к публикации/Accepted 13.01.2025

УДК 621.3.014.4
doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-8

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

А. Г. Дмитриенко¹, К. А. Семкина², Н. С. Ульянин³, Б. В. Цыпин⁴

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

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

¹ info@niifi.ru, ² po444t@mail.ru, ³ kolianul@mail.ru, ⁴ cypin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена разнообразием областей применения и конструкций вихретоковых датчиков. Представленная информация соответствует современному состоянию методов и средств технических измерений и отражает последние достижения науки и техники в рассматриваемой области. Целью работы является аналитический обзор современных видов, описание областей применения и рассмотрение тенденций развития вихретоковых датчиков. *Материалы и методы.* С помощью вихретокового метода неразрушающего контроля можно оценивать состояние и механические свойства материалов, определять толщину слоя, выявлять дефекты в виде несплошностей, измерять расстояние между быстро движущимися объектами и т.д. *Результаты и выводы.* Вихретоковый метод неразрушающего контроля по сравнению с другими методами обладает ощутимыми преимуществами, а именно: точностью полученных результатов, многопараметровостью, бесконтактностью, слабым влиянием факторов внешней среды, автоматизацией.

Ключевые слова: контроль, объект, вихретоковые датчики, вид, катушка индуктивности, сигнал, пробник, электромагнитный, объекты контроля, индуктивность

Для цитирования: Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Состояние и тенденции развития вихретоковых датчиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-8

THE STATE AND DEVELOPMENT TRENDS OF EDDY CURRENT SENSORS

A.G. Dmitrienko¹, K.A. Semkina², N.S. Ulyanin³, B.V. Tsy-pin⁴

^{1,2,3} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

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

¹ info@niifi.ru, ² po444t@mail.ru, ³ kolianul@mail.ru, ⁴ cypin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is due to the variety of applications and designs of eddy current sensors. The information contained in the article corresponds to the current state of methods and means of technical measurements and reflects the latest achievements of science and technology in the field under consideration. The purpose of the work is an analytical review of modern types, description of applications and consideration of trends in the development of eddy current sensors. *Materials and methods.* Using the eddy current method of non-destructive testing, it is possible to assess the condition and mechanical properties of materials, determine the thickness of the layer, identify defects in the form of discontinuities, measure the distance between fast-moving objects, etc. *Results and conclusions.* The eddy current method of non-destructive testing has tangible advantages over other methods, namely: accuracy of the results obtained, multiparameterization, non-contact, weak influence of environmental factors, automation.

Keywords: control, object, eddy current sensors, type, inductor, signal, probe, electromagnetic, control objects, inductance

For citation: Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsy-pin B.V. The state and development trends of eddy current sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1): 59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-8

Введение

Современный уровень развития промышленной индустрии подразумевает высокие требования к качеству выпускаемой продукции.

Одним из способов повышения качества продукции является применение объективных физических методов неразрушающего контроля [1]. К ним относится метод бесконтактного вихревого контроля, который реализуется с помощью вихревых датчиков перемещения.

Принцип работы данного типа датчиков основывается на электромагнитной теории. Вихревые токи, или токи Фуко, возникают в изделиях, которые обладают электропроводимостью и находятся под воздействием переменного магнитного поля [2].

У вихревых датчиков перемещения обширная область применения, объектами для их измерения могут быть любые электропроводящие изделия.

Существует несколько типов датчиков, конкретизация выбора определенного будет зависеть от задач неразрушающего контроля и особенностей аппаратуры [3].

Учитывая постоянное развитие промышленности, возрастают требования к конструкционным особенностям и функционалу самих датчиков, которые успешно решаются [4]. Тенденции развития вихревых датчиков определяются необходимостью их совершенствования ввиду постоянного развития технологий во всех областях [5, 6].

Актуальность данной темы требует более подробного ее раскрытия.

В данной работе будет проведен анализ использования вихревых датчиков и принцип их работы [7].

История вихревого метода контроля

Обнаруженное А. Гамбеем явление затухания колебаний подвешенного на нити магнита вблизи медной пластины является началом истории возникновения вихревого метода контроля [1].

Ф. Араго обнаружил, что подвешенная намагниченная игла смещается над вращающимся медным диском. Когда М. Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции, это наблюдаемое явление получило объяснение.

Значительный вклад в изучение вихревых токов был внесен французским ученым Л. Фуко. Явление поверхностного эффекта, описанное Дж. К. Максвеллом в 1873 г., позволило более подробно объяснить природу вихревых токов [8].

Понятие глубины проникновения токов внутрь контролируемого объекта [9] тесно связано с именем Ч. Штейнметца. Именно им было получено математическое выражение, с помощью которого можно описать распределение магнитной индукции в сечении цилиндрического стержня, который поместили в электрическую катушку, при условии, что она запитана переменным током.

Впервые на практике вихревой контроль применился в 1879 г. англичанином А. Хьюзом, который являлся разработчиком устройства для сортировки объектов. При этом объекты могли быть выполнены из различных материалов [9, 10].

Немецкий ученый Ф. Ферстер был первым, кто стал оперировать термином «дефектоскоп». Именно его можно считать основоположателем вихревого метода контроля [11]. В 1937 г. он начал работу над электромагнитными методами контроля. Ф. Ферстером было введено понятие эффективной магнитной проницаемости среды, комплексной плоскости ЭДС. Им был обширно рассмотрен вопрос взаимодействия вихревого преобразователя с объектом. Ввиду возможного возникновения различного рода помех именно он предложил ряд алгоритмов, которые позволяют произвести отстройку от помех при вихревом контроле [1].

Устройство вихревого датчика

Измерительная система вихревого датчика содержит четыре преобразующих блока. На рис. 1 представлена схема измерительной системы, которая может быть реализована в виде аналогового или цифрового прибора.

Вихревой датчик, или вихревая система, состоит из вихревого пробника, удлинительного кабеля и драйвера.

Катушка индуктивности, элемент, на котором базируется работа датчика, заключена в диэлектрическом наконечнике металлического зонда. Для локализации электромагнитного поля

в зоне магнитопровода и увеличения абсолютной чувствительности, обеспечения тем самым точечного воздействия преобразователя на объект контроля, катушки мотают на магнитопроводах (на ферритовых стержнях) [4]. Диаметр катушки будет влиять на величину измеряемого зазора [5].

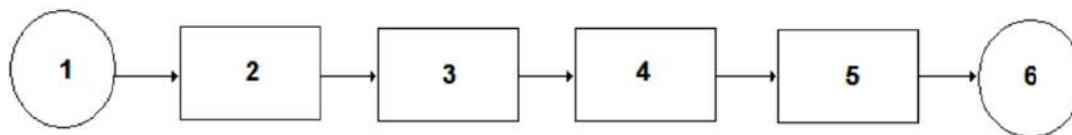


Рис. 1. Схема измерительной системы:

1 – объект контроля; 2 – чувствительный элемент; 3 – первичный преобразователь; 4 – измерительный преобразователь; 5 – передающий преобразователь; 6 – оператор, производящий измерения [1]

Вихретоковый пробник представляет собой зонд с отрезком коаксиального кабеля на одном конце, заканчивающимся разъемом и с катушкой индуктивности, заключенной в диэлектрическом наконечнике на другом. Пробник соединяется с драйвером с помощью коаксиального удлинительного кабеля или напрямую.

Драйвер выглядит как герметичная металлическая коробка с разъемом для подключения пробника и разъемом для получения выходного сигнала и подачи питания. Основные функции драйвера – вырабатывать сигнал возбуждения пробника и осуществлять выделение информативного параметра.

Электрический сигнал, прямо пропорциональный расстоянию от торца вихревого пробника до контролируемого объекта, будет являться выходным сигналом драйвера [3].

Принцип работы

Вследствие электромагнитной индукции в электропроводящей среде при изменении электромагнитного поля будут возникать вихревые токи индукционной природы [2].

Принцип работы вихретокового датчика основан на анализе взаимодействия двух электромагнитных полей – внешнего источника (обмотка возбуждения датчика) и тех, которые возбуждаются в объекте контроля переменным электромагнитным полем датчика [10, 11].

На рис. 2 представлено графическое изображение вихревых токов, генерируемых на металлической пластине цилиндрической катушкой индуктивности (пробником), и представлены электромагнитные поля, формируемые пробником и объектом контроля.

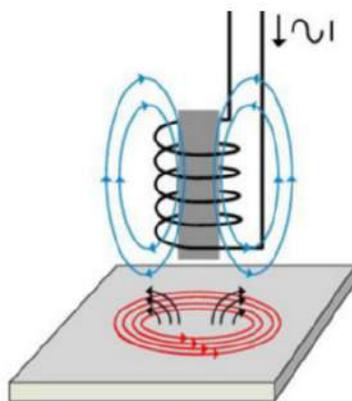


Рис. 2. Визуализация вихревых токов и связанных с ними магнитных полей [9]

Драйвер вырабатывает сигнал возбуждения пробника. При подведении торца диэлектрического наконечника с катушкой индуктивности вихретокового пробника к объекту контроля, при условии обладания им электропроводимости, на его поверхности наводятся вихревые токи. Электромагнитное поле вихревых токов взаимодействует с электромагнитным полем индуктивной катушки пробника, изменяя ее активное и индуктивное сопротивление [5, 10].

С помощью драйвера происходит преобразование изменения зазора между контролируемым объектом и торцом датчика в электрический сигнал [3]. Драйвер осуществляет линейризацию и масштабирование полученного электрического сигнала.

Тип системы наблюдения будет определять, в каком виде будет представлен выходной сигнал. Он может быть в виде тока, напряжения или представлен в виде цифрового формата.

Виды вихрековых датчиков

Конфигурации вихрековых датчиков могут отличаться между собой: диаметром катушки пробника, длиной кабеля, параметрами выходного сигнала и характером измеряемой величины.

Наиболее оптимальным является использование катушки с ферромагнитным сердечником, так как магнитная проницаемость последнего ощутимо влияет на повышение индуктивности самой катушки. Существует возможность влияния на формирование требуемой конфигурации магнитного потока путем придания сердечнику определенной формы. На рис. 3 наглядно показан магнитный поток формируемый катушками различных конфигураций.

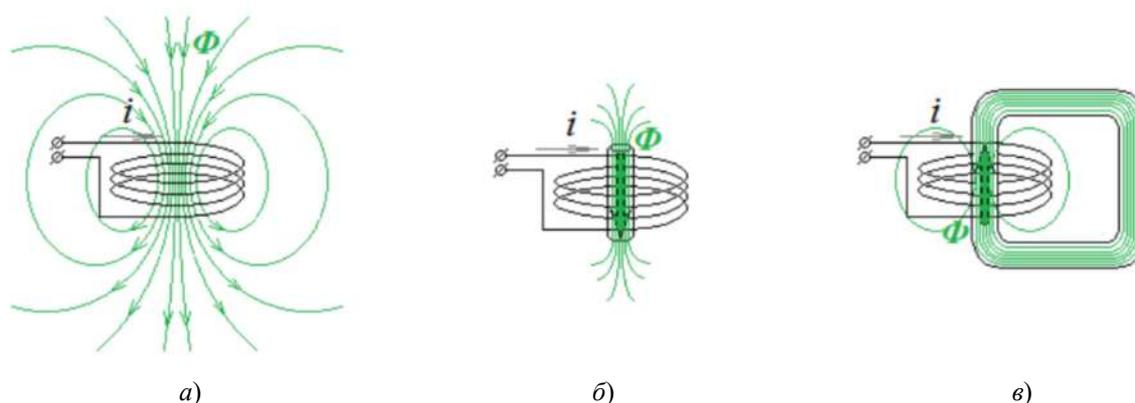


Рис. 3. Магнитный поток, формируемый катушкой:
а – без сердечника; б – с сердечником; в – с замкнутым сердечником [11]

Рабочая частота катушки индуктивности будет влиять на глубину проникновения вихревых токов в проводящие изделия [9].

Взаимосвязь рабочей частоты и глубины проникновения показана на рис. 4.

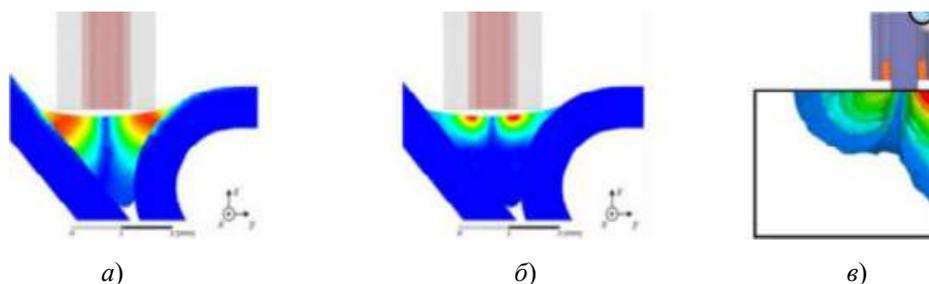


Рис. 4. Численное моделирование распределения плотности вихревых токов:
а – низкая частота, обеспечивающая увеличенную глубину проникновения; б – высокая частота, вызывающая выраженный скин-эффект; в – искажение потока вихревых токов у кромки [9]

Чем меньше радиус катушки индуктивности, тем больше чувствительность датчика к микродефектам. Самыми распространенными датчиками для контроля микродефектов на поверхности деталей являются датчики с диаметром катушки индуктивности 1 и 0,5 мм, обеспечивающие сканирование деталей с шагом 1 и 0,5 мм соответственно [4].

Драйвер должен калиброваться для каждой комбинации катушки и кабеля или пробника [3].

Виды вихрековых датчиков: параметрические, трансформаторные, абсолютные, дифференциальные, проходные, наружные, внутренние, экранные, погружные, щелевые, накладные, экранные накладные, комбинированные.

Принадлежность к трансформаторным или параметрическим датчикам будет зависеть от особенностей преобразования параметров исследуемого объекта в выходные сигналы. У трансформаторных датчиков одна возбуждающая обмотка. Их значительный минус будет заключаться в том, что их выходной сигнал будет зависеть от температуры исследуемого объекта и

внешней среды. Параметрические имеют возбуждающую и измерительную обмотки. Их выходной сигнал не будет так зависеть от температурных воздействий, как у предыдущих датчиков.

На рис. 5, 6 изображены параметрические и трансформаторные датчики соответственно.

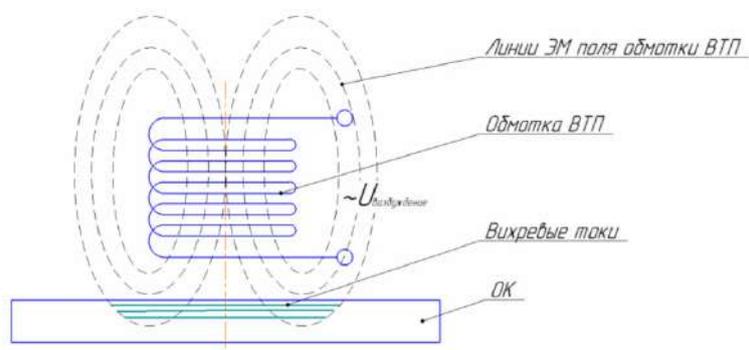


Рис. 5. Изображение параметрических вихретоковых датчиков [11]

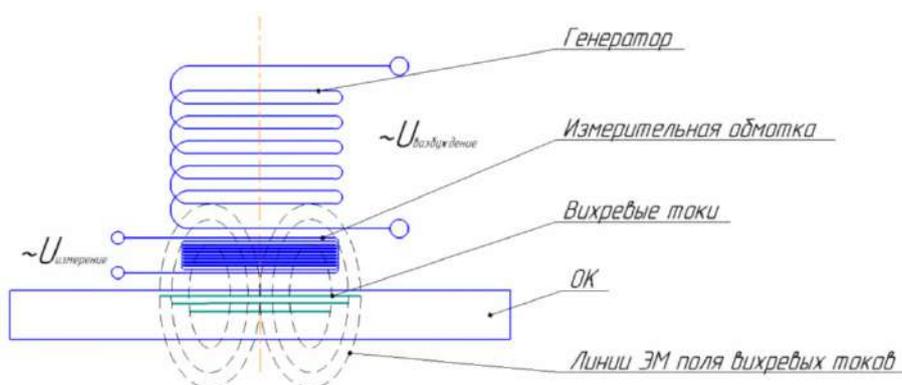


Рис. 6. Изображение трансформаторных вихретоковых датчиков [11]

На принадлежность к абсолютным или дифференциальным вихретоковым датчикам будет влиять способ соединений катушек индуктивности.

У абсолютных датчиков абсолютные значения параметров объектов контроля определяют выходной сигнал. Дифференциальные датчики представляют собой сочетание двух абсолютных датчиков. При этом обмотки возбуждения у них соединены последовательно согласно, измерительные – встречно. Выходной сигнал этого вида датчиков будет зависеть от разности значений параметров объекта в интересующей зоне.

На рис. 7 представлен дифференциальный вихретоковый датчик.

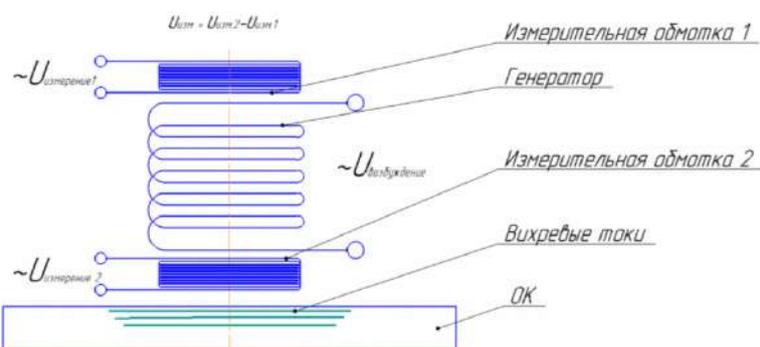


Рис. 7. Один из вариантов дифференциального вихретокового датчика [11]

В зависимости от того, каким образом датчик расположен в пространстве относительно объекта исследования, выделяют следующие типы датчиков:

1. Проходные (рис. 8, 9). В свою очередь, они могут быть наружными, внутренними, погружными, экранными, щелевыми. У этого вида датчика катушка может охватывать объект

из-за особой конструктивной специфики магнитопровода [2]. Изображение проходных вихревых датчиков представлено на рис. 8.

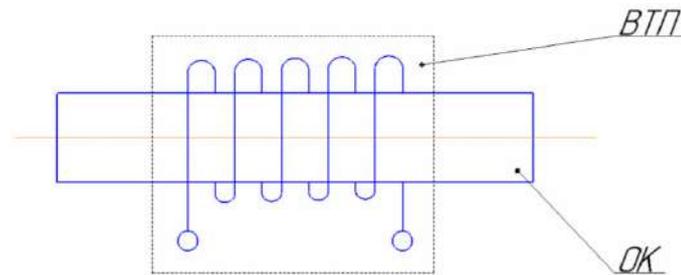


Рис. 8. Проходной вихревой датчик [11]

На рис. 9 изображен проходной наружный вихревой датчик.

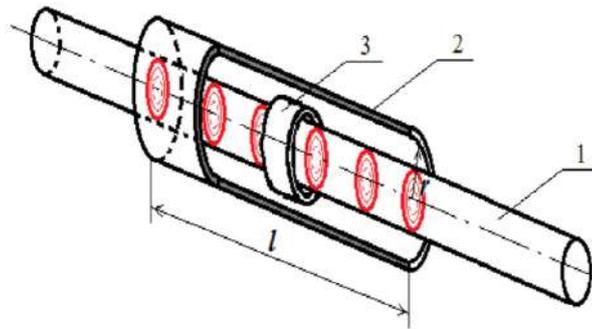


Рис. 9. Контроль цилиндрического стержня наружным проходным вихревым преобразователем:
 l – объект контроля; 2 – обмотка возбуждения; 3 – измерительная обмотка;
 l – длина; r – радиус обмотки возбуждения [2]

2. Накладные. Обмотки катушки индуктивности у этого вида датчиков бывают различные: прямоугольные, круглые, крестообразные, с взаимно перпендикулярными осями. Накладные датчики превосходят проходные по уровню контроля геометрических и электромагнитных параметров объектов, которые имеют сложную форму.

Изображение накладных датчиков представлено на рис. 10.

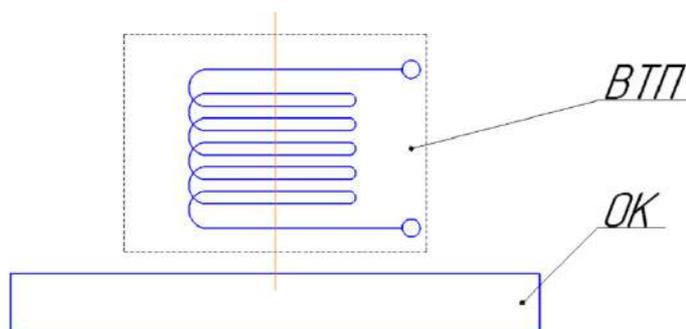


Рис. 10. Накладные вихревые датчики [8]

3. Комбинированные. Совмещают свойства проходных и накладных датчиков. Имеют проходные возбуждающие и накладные измерительные катушки. Из-за этого возможно применение датчика для расширенного ряда объектов, однако есть вероятность неверных результатов контроля ввиду смещения осей катушки.

Наружные проходные датчики применяются в случае необходимости контроля линейно-протяженных объектов мелких изделий.

Катушки индуктивности внутренних проходных видов датчиков вводят внутрь объекта контроля.

Катушки индуктивности погружных видов проходных датчиков помещают в контролируемую среду (жидкую электропроводящую).

Экранные виды проходных датчиков отличаются тем, что возбуждающие и измерительные катушки индуктивности располагают по разные стороны объекта контроля.

Щелевые виды проходных датчиков сконструированы с магнитопроводом, который будет охватывать объект контроля. Используют для контроля проволоки.

Особенность накладных видов датчиков заключается в том, что их размещают непосредственно вблизи поверхности объекта контроля, что позволяет им контролировать электромагнитные параметры объектов сложных форм.

В экранных накладных видах возбуждающие и измерительные катушки индуктивности располагают по разные стороны объекта контроля.

Встречаются линейные специальные типы датчиков, выполненные в виде рамок или линейно-протяжных витков.

Широкие возможности бесконтактного вихревого контроля не могут полностью характеризоваться указанной классификацией ввиду постоянного создания современных датчиков с более совершенным и расширенным функционалом для удовлетворения потребностей различных сфер промышленности [3, 4].

В зависимости от вида электромагнитного поля, которое возбуждает электротоки, встречаются одночастотные, многочастотные и импульсные вихретоковые преобразователи [9].

Недостатки и преимущества вихретоковых датчиков

Несмотря на незначительность, влияние факторов окружающей среды на результат измерений нельзя полностью игнорировать. Например, воздействие экстремальной температуры окружающей среды на датчик может приводить к дополнительной погрешности измерения, для компенсации воздействия температуры окружающей среды был разработан специальный импульсный метод возбуждения вихретокового пробника [3].

Ввиду того, что датчики маленького размера являются более чувствительными к дефектам, но обладают небольшими шагом сканирования и скоростью исследования, были изобретены многоканальные вихретоковые сканеры. Эти сканеры компактны, но способны охватывать большую подконтрольную плоскость [4].

Новые конструктивные решения помогают совершенствовать функционал датчиков, учитывая возникающие требования различных сфер промышленности.

Созданию датчиков с более совершенной конструкцией и расширенным функционалом будет также способствовать быстрое развитие цифровых технологий и микроэлектроники. Новый функционал может включать: правильную интерпретацию результатов контроля, обнаружение дефектов разных типов, применение сетевых ресурсов для обработки, хранения и использования информации об объектах контроля, применение искусственного интеллекта для создания базы данных дефектов и автоматического выявления определенного вида дефектов.

Преимущества вихретокового бесконтактного неразрушающего контроля заключаются в следующем:

1. **Бесконтактность.** Отсутствует необходимость подготавливать контролируемую поверхность. Взаимодействие пробника датчика и объекта обычно происходит на расстоянии (долей миллиметра или нескольких миллиметров), благодаря этому можно делать замеры при высоких скоростях движения контролируемого объекта [1, 11].

2. **Точность полученных результатов.** При вихретоковом методе контроля выходной сигнал имеет прямую корреляцию с величиной зазора между торцом пробника и поверхностью контролируемого объекта, поэтому при этом методе не требуется математическая обработка результатов измерения. Вихретоковый метод контроля не имеет нижнего предела по частоте.

3. **Многопараметровость.** Именно она позволяет отойти от тех факторов, которые негативно влияют на полученный результат. Проекция амплитудного или фазового значения сигнала или их приращение на разных частотах регистрации может выступать в качестве измеряемых величин.

4. **Слабое влияние внешних факторов.** Незначительность влияния таких факторов внешней среды, как: влажность, давление, загрязненность воздуха, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности контроля [9].

5. Высокий уровень автоматизации. Возможность хранения результатов контроля в электронном виде.

Преимущества и недостатки вихретокового бесконтактного контроля взаимосвязаны между собой. Недостатки, как и преимущества, имеют своей основой особенности конструкции датчиков и теорию электромагнитного поля.

Можно выделить следующие основные недостатки:

– невозможно обнаружить дефекты, которые находятся ниже глубины проникновения вихревых токов. Ограниченная глубина проникновения является существенной проблемой вихревых токов. Скин-эффект, который заключается в том, что генерируемые зондом вихревые токи ограничены поверхностью или приповерхностными областями материала, будет сводиться к экспоненциальному уменьшению плотности вихревых токов с глубиной [9];

– только электропроводящие объекты могут подвергаться контролю;

– сканировать поверхности, которые скрыты для доступа преобразователя, невозможно;

– затруднения при проведении вихретокового контроля при отсутствии однородных электромагнитных свойств объекта. В этом случае используют дифференциальные датчики и сложные алгоритмы обработки сигналов [4].

Несмотря на наличие недостатков, вихретоковые датчики перемещений отличаются надежностью, долговечностью и результативностью измерений. Именно наличие недостатков стимулирует дальнейшее развитие более совершенных конструкции и функционала этого вида датчиков [12–15].

Тенденции развития вихретоковых датчиков

Направления развития конструктивного функционала вихретоковых датчиков связаны с возрастающими требованиями к характеристикам датчиков в связи с особенностями спроса на современном техническом рынке.

К основным тенденциям развития приборов бесконтактного вихретокового контроля можно отнести:

– использование датчиков в автомобильной промышленности, авиастроении, космической отрасли;

– миниатюризация и интеграция в различные сложные системы модулей вихретокового контроля;

– использование датчиков в сфере промышленной автоматизации;

– использование вихретоковых датчиков при экстремальных внешних воздействующих факторах (температуры, радиации, механических воздействиях);

– появление интеллектуальных датчиков с возможностью самодиагностики неисправности отдельных узлов и отключения дефектных модулей, накопления статистической информации о измеряемом параметре и автоматической фиксации требуемых параметров контроля;

– повышение энергоэффективности, перевод в пассивный режим в отсутствие необходимости использования датчика [5].

Наблюдаются следующие тенденции в улучшении характеристик датчиков:

– преобладание целенаправленной цифровизации при обработке сигналов с пробника;

– уход от аналоговых решений, в частности переход от измерения амплитуды полезного сигнала к измерению времени или частоты этого сигнала из-за высокой точности современных источников опорной частоты, по сравнению с источниками опорного напряжения [6];

– применение алгоритмов искусственных нейронных сетей для анализа и коррекции информации [16];

– упрощение конструкции преобразователя при переходе к цифровой обработке сигнала;

– повышение точности преобразования физических величин при использовании изменения частоты в зависимости от измеряемого параметра и перехода от аналогового сигнала к цифровому;

– автоматическая регулировка параметров прибора за счет обратных связей [6].

Заключение

В данной работе проведен аналитический обзор вихретоковых датчиков.

Принцип работы вихретокового датчика основывается на действии вихревых токов, электромагнитной индукции и опирается на теорию электродинамики [2].

Вихретоковый метод неразрушающего контроля по сравнению с другими методами обладает ощутимыми преимуществами, а именно: точностью полученных результатов, многопараметровостью, бесконтактностью, слабым влиянием факторов внешней среды, автоматизацией.

С помощью вихретокового метода неразрушающего контроля можно оценивать состояние и механические свойства материалов, определять толщину слоя, выявлять дефекты в виде несплошностей, измерять расстояние между быстро движущимися объектами и т.д.

Главенствующей областью применения датчиков является радиальная вибрация вала ротора относительно корпуса и осевое смещение.

Виды вихретоковых датчиков перемещения зависят от конструктивных и функциональных особенностей вихретоковых датчиков систем. Вихретоковые датчики бывают параметрические, трансформаторные, абсолютные, дифференциальные, проходные, накладные, комбинированные, наружные, внутренние, экранные, погружные, щелевые.

Несмотря на то, что история появления метода начинается с конца XIX в., конструктивно и функционально вихретоковые датчики совершенствуются до сих пор, в соответствии с изменяющимися требованиями.

Список литературы

1. Грошков Е. П., Ключев А. В., Кирпичев А. А., Редюшев А. А. Интеллектуальные вихретоковые датчиковые системы // Компоненты и технологии. 2009. № 1. С. 22–24.
2. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля. Новосибирск : СГУПС, 2019. 98 с.
3. Маркелов М. К. Разработка вихретокового преобразователя для измерения зазора // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 270–273.
4. Грабовский А. В., Петров Г. А. Многоканальные сканеры вихретокового контроля // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 42–48.
5. verifiedmarketreports.com. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/blog/top-7-emerging-trends-shaping-the-future-of-the-inductive-position-sensors-market> (дата обращения: 18.10.2024).
6. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Модель стабилизации вихретоковых датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 58–68. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
7. Семкина К. А. Вихретоковые датчики. Устройство, преимущества и недостатки, аналитический обзор современных видов датчиков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2024. Т. 2. С. 269–271.
8. Бакли Д. М. Введение в теорию и технологию вихретокового тестирования. URL: <http://joe.buckley.net/papers/eddys.pdf> (дата обращения 18.10.2024).
9. Мигель А. Конструкция вихретокового датчика для неразрушающего контроля: обзор // Датчики. 2024. № 17. С. 42. doi: 10.3390/s24175819 ISSN 1424-8220
10. SURAGUS. URL: <https://www.suragus.com/en/technology/> (дата обращения 18.10.2024).
11. ets-ndt.ru. URL: <https://ets-ndt.ru/azbuka/metod-vikhretok/?ysclid=m2hprqvn36o840410814> (дата обращения 18.10.2024).
12. Проскуряков М. В., Силин А. М., Нижегородов В. В. Вихревые токи (Токи Фуко) // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. М., 2017. С. 425–428.
13. Малащук А. М., Сычик А. В. Вихревые токи Фуко // Актуальные проблемы энергетики. 2016. № 1. С. 487–488.
14. Маликов В. Н. Контроль неоднородностей, примесей и дефектов проводящих сплавов и композиционных материалов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2019. 151 с.
15. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль. М. : Спектр, 2011. 223 с.
16. Ульянин Н. С., Тужилкин О. В. Применение нейронных сетей для повышения метрологических характеристик датчиков при измерении динамических процессов // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 41–44.

References

1. Groshkov E.P., Klyushev A.V., Kirpichev A.A., Redyushev A.A. Intelligent eddy current sensor systems. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*. 2009;(1):22–24. (In Russ.)
2. Bobrov A.L., Vlasov K.V., Bekher S.A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushayushchego kontrolya = Fundamentals of eddy current non-destructive testing*. Novosibirsk: SGUPSa, 2019:98. (In Russ.)

3. Markelov M.K. Development of an eddy current transducer for gap measurement. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2011;2:270–273. (In Russ.)
4. Grabovskiy A.V., Petrov G.A. Multichannel eddy current control scanners. *SPbGETU «LETI» = SPbSETU "LETI"*. 2016;(9):42–48. (In Russ.)
5. *verifiedmarketreports.com*. Available at: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/blog/top-7-emerging-trends-shaping-the-future-of-the-inductive-position-sensors-market> (accessed 18.10.2024).
6. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsylin B.V. Model of stabilization of eddy current displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):58–68. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
7. Semkina K.A. Eddy current sensors. Device, advantages and disadvantages, analytical review of modern types of sensors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;2:269–271. (In Russ.)
8. Bakli D.M. *Vvedenie v teoriyu i tekhnologiyu vikhretokovogo testirovaniya = Introduction to the theory and technology of eddy current testing*. (In Russ.). Available at: <http://joe.buckley.net/papers/eddy.pdf> (accessed 18.10.2024).
9. Migel' A. Eddy current sensor design for non-destructive testing: an overview. *Datchiki = Sensors*. 2024;(17):42. (In Russ.). doi: 10.3390/s24175819 ISSN 1424-8220
10. *SURAGUS*. Available at: <https://www.suragus.com/en/technology/> (accessed 18.10.2024).
11. *ets-ndt.ru*. (In Russ.). Available at: <https://ets-ndt.ru/azbuka/metod-vikhretok/?ysclid=m2hqpvn36o840410814> (accessed 18.10.2024).
12. Proskuryakov M.V., Silin A.M., Nizhegorodov V.V. Eddy currents (Foucault currents). *Novye tekhnologii nauki, tekhniki, pedagogiki vysshey shkoly: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = New technologies of science, technology, pedagogy of higher education : materials of the International scientific and practical conference*. Moscow, 2017:425–428. (In Russ.)
13. Malashchuk A.M., Sychik A.V. Foucault's eddy currents. *Aktual'nye problemy energetiki = Actual problems of energy*. 2016;(1):487–488. (In Russ.)
14. Malikov V.N. *Control of inhomogeneities, impurities and defects of conductive alloys and composite materials using superminiature eddy current converters*. PhD dissertation. Barnaul, 2019:151. (In Russ.)
15. Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyy kontrol' = Eddy current control*. Moscow: Spektr, 2011:223. (In Russ.)
16. Ul'yanin N.S., Tuzhilkin O.V. The use of neural networks to improve the metrological characteristics of sensors when measuring dynamic processes. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):41–44. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Геннадиевич Дмитриенко

доктор технических наук, доцент,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
заведующий кафедрой ракетно-космического
и авиационного приборостроения
на базе Научно-исследовательского института
физических измерений,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: info@niifi.ru

Aleksei G. Dmitrienko

Doctor of technical sciences,
associate professor, general manager,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
head of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making
on the base of Scientific Research
Institute of Physical Measurements,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Александровна Семкина

специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10);
магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: po444t@mail.ru

Kristina A. Semkina

Specialist,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia);
master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Сергеевич Ульянов

начальник центра проектирования систем № 1,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: kolianul@mail.ru

Nikolai S. Ulyanin

Head of the system design center № 1,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения на базе
Научно-исследовательского института
физических измерений,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Boris V. Tsypin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making
on the base of Scientific Research
Institute of Physical Measurements,
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 05.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 02.12.2024

Принята к публикации/Accepted 13.01.2025

ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

А. А. Максов¹, Е. А. Печерская², П. Е. Голубков³,
О. А. Мельников⁴, Б. В. Чувькин⁵, С. А. Потешкин⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ maksov.01@mail.ru, ² peal@list.ru, ³ golpavpnz@yandex.ru,

⁴ oleg-068@mail.ru, ⁵ chuvykin_bv@mail.ru, ⁶ iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В связи с повышенным интересом к использованию оксидных покрытий в различных отраслях промышленности, в том числе медицине и электронике, необходима систематизация известных требований к параметрам качества и эксплуатационным свойствам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения. Целью работы является установление соответствия параметров качества микродуговых оксидных покрытий требованиям в зависимости от области их применения. *Материалы и методы.* Проанализированы требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам высокопрочных защитных покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования, в контексте применения их в авиакосмической технике, машиностроении, а также изделиях медицинского назначения. *Результаты.* На основе анализа конкретных примеров существующих областей применения микродуговых оксидных покрытий выявлены требования к их эксплуатационным характеристикам. Рассмотрены примеры многофункциональных оксидных покрытий на алюминии и титане с точки зрения указанных требований, показана целесообразность их использования в машиностроении, в авиакосмической отрасли и изделиях медицинского назначения. *Выводы.* Полученные результаты использованы при разработке цифрового двойника процесса получения микродуговых оксидных покрытий с заданными свойствами.

Ключевые слова: машиностроение, требования качества, износостойкость, авиационно-космическая промышленность, изделия медицинского назначения, микродуговое оксидирование, толщина, пористость

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования», № 123091800009-1.

Для цитирования: Максов А. А., Печерская Е. А., Голубков П. Е., Мельников О. А., Чувькин Б. В., Потешкин С. А. Требования к параметрам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 70–78. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-9

REQUIREMENTS FOR THE PARAMETERS OF MICROARC OXIDE COATINGS DEPENDING ON THEIR FIELD OF APPLICATION

A.A. Maksov¹, E.A. Pecherskaya², P.E. Golubkov³,
O.A. Melnikov⁴, B.V. Chuvykin⁵, S.A. Poteshkin⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

¹ maksov.01@mail.ru, ² peal@list.ru, ³ golpavpnz@yandex.ru,

⁴ oleg-068@mail.ru, ⁵ chuvykin_bv@mail.ru, ⁶ iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Due to the increased interest in the use of oxide coatings in various industries, including medicine and electronics, it is necessary to systematize the known requirements for the quality parameters and operational properties of microarc oxide coatings, depending on their field of application. The aim of the work is to establish the compliance of the quality parameters of microarc oxide coatings with the requirements depending on their field of application. *Materials and methods.* The requirements for the performance characteristics of high-strength protective coatings obtained by microarc oxidation are analyzed in the context of their application in aerospace engineering, mechanical engineering, and medical devices. *Results.* Based on the analysis of specific examples of existing applications of microarc oxide coatings, the requirements

for their operational characteristics have been identified. Examples of multifunctional oxide coatings on aluminum and titanium are considered from the point of view of these requirements, and the expediency of their use in mechanical engineering, the aerospace industry, and medical devices is shown. *Conclusions.* The results obtained were used in the development of a digital twin of the process of obtaining microarc oxide coatings with specified properties.

Keywords: mechanical engineering, quality requirements, wear resistance, aerospace industry, medical devices, microarc oxidation, thickness, porosity

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Fundamentals of the digital twin of the technological process of forming oxide coatings with specified properties by microarc oxidation», № 123091800009-1.

For citation: Maksov A.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Melnikov O.A., Chuvykin B.V., Poteshkin S.A. Requirements for the parameters of microarc oxide coatings depending on their field of application. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):70–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-9

Введение

В условиях постоянного развития техники и технологий поверхностные покрытия играют все более важную роль в производстве. Передовые технологии обработки поверхностей позволяют инженерам выбирать более легкие материалы за счет наилучшего сочетания малого веса и высокой прочности. Металлы вентильной группы находят широкое применение при производстве изделий и компонентов, используемых в аэрокосмической, автомобильной, оборонно-промышленной, медицинской и других отраслях.

Одной из таких технологий обработки поверхности является микродуговое оксидирование (МДО) – это технология, принцип действия которой основан на использовании плазменно-электролитического процесса формирования на поверхности легких сплавов (алюминий, магний, титан и др.) упрочняющих покрытий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками (микротвердость, износостойкость [1–4], адгезия к подложке, биосовместимость [5] и др.). Кроме этого, современные оксидные покрытия способны улучшить характеристики и срок службы легких сплавов, гарантирующие защиту поверхности от износа, коррозии под воздействием технологических химикатов и веществ в рабочей среде.

Имеются также и другие преимущества модификации поверхности методом микродугового оксидирования, например, улучшение коэффициента трения за счет увеличения пористости покрытия, придание антибактериальных свойств и повышение электрической прочности.

Однако легкие сплавы обладают не только преимуществами, ряд свойств ограничивает область их применения. Например, одним из таких сплавов является магний, который химически активен, а также отличается низкой твердостью, слабым сопротивлением ползучести и довольно высокой степенью воспламеняемости. Поэтому магний не всегда подходит для применения в тех областях, где требуется устойчивость к коррозии и износу.

Свойства оксидных покрытий, обуславливающие их область применения

В зависимости от области применения, требований нормативной документации на изделие конкретного типа к свойствам формируемых оксидных покрытий предъявляются специфические требования.

Применение микродуговых оксидных покрытий позволяют обеспечить:

- коррозионную стойкость изделий;
- износостойкость;
- стойкость деталей и узлов, работающих в условиях высоких температур (до 400 °С) и термоциклических нагрузок;
- электроизоляционные свойства поверхностей изделий;
- светопоглощающие свойства изделий;
- защитно-декоративные свойства поверхностей изделий.

Для микродуговых оксидных покрытий, применяемых в авиакосмической отрасли, машиностроении, предъявляются требования к толщине, пористости, микротвердости, термостойкости [6], а также коррозионной стойкости, а для изделий медицинского назначения (имплантатов, протезов), напротив, первоочередными являются требования биосовместимости и антибактериальных свойств оксидных покрытий. Необходимо учитывать требования, предъявляемые к параметрам качества и свойствам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения.

В работе систематизированы требования к характеристикам высокопрочных защитных покрытий, получаемым методом микродугового оксидирования в контексте применения в авиакосмической технике, машиностроении и изделиях медицинского назначения.

Применение МДО-покрытий в авиационно-космической технике

Целесообразно рассмотреть несколько вариантов применения оксидных покрытий, выполненных на металлах вентильной группы для авиационно-космической промышленности.

Одним из ярких примеров применения МДО-покрытий в авиационно-космической технике является оборудование, расположенное на борту обитаемых отсеков Международной космической станции (МКС). Космическая техника может подвергаться воздействию влажности до 70 %. Кроме этого, космические аппараты и оборудование, которые хранятся на Земле в течение значительного периода времени и запускаемые в космос, часто подвергаются воздействию коррозионных сред, а также повторяющийся механический контакт алюминиевых сплавов в вакууме может привести к заклиниванию при холодной сварке.

Обширное применение в авиационно-космической технике имеют и черные функциональные керамические покрытия. Причины их широкого использования в условиях космического пространства связаны с характеристиками и уникальными особенностями объектов, имеющих покрытия черного цвета. Черные покрытия имеют высокую степень поглощения света, что позволяет эффективно захватывать солнечное излучение. Это может быть полезно для нагрева поверхностей солнечных батарей и нагревательных элементов на космических аппаратах. Кроме этого, в условиях космоса, где нет атмосферы, теплоотведение происходит более медленно, и черные покрытия помогают поддерживать высокую температуру на поверхности оборудования, что может сказаться на работоспособности оборудования. Это связано со свойствами поглощения тепла черными объектами (коэффициент теплового поглощения не превышает 0,7–0,85). Для минимизации световых помех и улучшения качества получаемых изображений за счет малого коэффициента отражения света также применяются черные керамические покрытия, имеющие низкий коэффициент отражения света, влияющий на работу оптических приборов и систем.

В целях повышения надежности и эффективности компонентов авиационно-космической техники, применяемых в агрессивных условиях стратосферы и космического пространства, к эксплуатационным свойствам микродуговых оксидных покрытий предъявляется следующий ряд требований:

- 1) минимальная плотность покрытия, наносимого на легкие сплавы (не больше 10 г/м²), что позволит облегчить вес самого элемента и общей конструкции в целом;
- 2) высокая микротвердость формируемого покрытия – не менее 1500 по шкале Виккерса;
- 3) защита металла от коррозии – не менее 500 ч в условиях соляного распыления;
- 4) минимальный уровень износа (не меньше 2 мг при проведении исследований на износ);
- 5) температурный диапазон от –60 до +300 °С (для лопаток турбин реактивных двигателей – 1927 °С);
- 6) стабильность в вакууме;
- 7) преобладание стабильных термооптических характеристик и большого поверхностного сопротивления (не менее 10⁹ Ом).

Применение оксидных покрытий в машиностроении

Высокопрочные покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования распространены в машиностроении.

Центрирующие кольца из алюминиевого сплава 6082, представляющего собой деформируемый сплав алюминия, магния и кремния (AlSi1MgMn – EN AW-6082), используется в качестве уплотнительных элементов для соединения турбомолекулярных насосов с вакуумными установками. В случае аварии ротора-статора – один из возможных неблагоприятных типов неисправностей – энергия вращения ротора передается на корпус в течение миллисекунд. Для того чтобы центрирующие кольца могли передавать посредством трения развивающиеся высокие крутящие моменты в систему, а также для предотвращения скручивания насоса во фланце, поверхности должны быть чрезвычайно износостойкими и иметь определенную шероховатость.

Одним из наиболее требовательных применений компонентов из алюминиевых сплавов является применение геометрически высокоточных роторов из AlSi1MgMn (EN AW-6082), которые устанавливаются в турбомолекулярных насосах, используемых в процессах плазменного травления. Решающим фактором в этой области является необходимость создания защитных поверхностей, полностью лишенных пор и трещин, а также не подверженных воздействию

реакционных газов. Чрезвычайно высокая скорость вращения роторов означает, что они также подвергаются, соответственно, экстремальным механическим нагрузкам. Традиционные методы защиты поверхности, такие как анодирование, хромирование или никелирование, не выдерживают таких нагрузок [7].

Также МДО-покрытия наносят на пары трения, подшипники скольжения, зубчатые передачи, поршни, цилиндры, торцевые уплотнения для двигателей внутреннего сгорания, станков и машин. Упрочнение деталей цилиндропоршневой группы дает повышение износостойкости в 10–15 раз, снижение механических затрат на 40–50 %, массы, материалоемкости и теплонагруженности, повышение КПД на 2–15 %. Помимо кратного увеличения износостойкости и наработки на отказ, использование алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями существенно улучшает динамические характеристики движущихся деталей узлов.

В машиностроении сверхтвердые оксидные слои, сформированные методом МДО, нашли свое применение как износостойкие и антифрикционные покрытия взамен легированной стали, что обеспечивает существенное увеличение износостойкости и наработки на отказ.

К эксплуатационным характеристикам оксидных покрытий, применяемых в отрасли машиностроения, в основном предъявляются требования, направленные на повышение коррозионной стойкости в агрессивных средах (например, масла, кислоты, газы), увеличение износостойкости и температурного диапазона эксплуатации. Далее приведены требования к формируемым покрытиям методом микродугового оксидирования:

- 1) толщина покрытия от 5 до 100 мкм;
- 2) микротвердость формируемого покрытия должна находиться в диапазоне от 800 до 2000 по шкале Виккерса;
- 3) пористость покрытия варьируется от 5 до 40 %;
- 4) сопротивление к износу не должно превышать 5 мг;
- 5) коррозионная стойкость должна быть больше 1000 ч (в условиях соляного распыления);
- 6) температурный диапазон эксплуатации варьируется в зависимости от областей применения, например:

– для защиты от коррозии и износа в менее агрессивных условиях – температура не должна превышать 200 °С;

– если МДО-покрытия используются в условиях, где температура рабочей среды повышается (например, в двигателях внутреннего сгорания и др.), то такие покрытия должны выдерживать рабочую температуру от 200–500 °С;

– 500–800 °С и выше – такую температуру должны выдерживать МДО-покрытия, используемые в жаростойких изделиях и деталях.

Исследования, проводимые авторами в работе [7], также направлены на изучение морфологии поверхностей покрытий, полученных способом микродугового оксидирования на алюминиевых сплавах, а также эксплуатационных характеристик.

МДО-обработка образцов из алюминиевого сплава проводилась в силикатно-щелочном электролите (0,5 г/л NaOH и 80 г/л Na₂SiO₃).

Для исследования морфологии поверхности был применен растровый электронный микроскоп (РЭМ) VEGA 3 TESCAN. Пористость была оценена с использованием программного обеспечения (ПО) непосредственно РЭМа.

Рисунок 1 демонстрирует топологию поверхности МДО-покрытия алюминия.

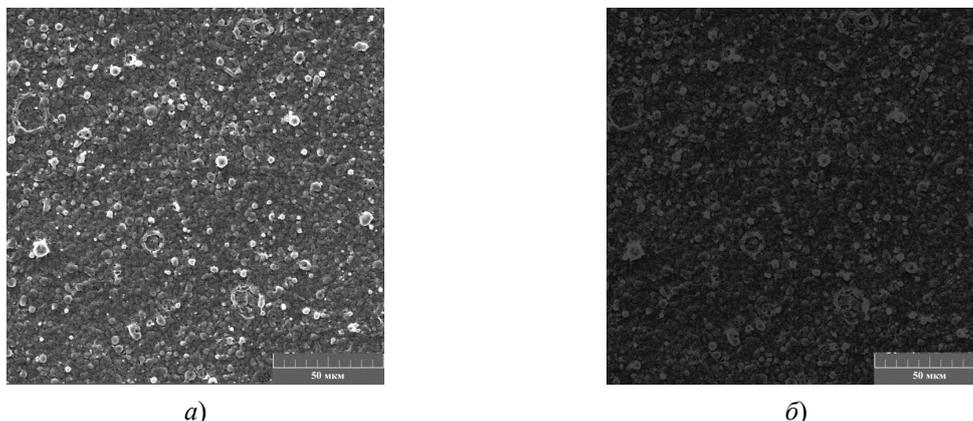


Рис. 1. Морфология поверхности МДО-покрытия, полученного на алюминии:

a – исходное изображение МДО-покрытия; *б* – изображение МДО-покрытия после обработки ПО

Таблица 1

Значение пористости оксидного покрытия на образцах алюминия

Сквозная пористость, P_{skvozs} , %	Поверхностная пористость, $P_{poverhs}$, %	Общая пористость, P_{obsh} , %
15,03	19,48	34,51

На рис. 1,б темными оттенками показана сквозная пористость, светлыми – поверхностная.

Пористость многофункциональных покрытий на образцах алюминия (табл. 1), полученная с использованием разработанного авторами программного обеспечения, соответствует требованиям пористости МДО-покрытий и находится в необходимом диапазоне (от 5 до 40 %). Полученные покрытия можно применять как в изделиях машиностроительной отрасли, так и в авиакосмической промышленности.

Применение МДО-покрытий в изделиях медицинского назначения

Также способ получения покрытий методом микродугового оксидирования находит применение и в производстве изделий медицинского назначения.

С его помощью формируют кальций-фосфатные (КФ) покрытия на поверхности имплантатов из биоинертных сплавов титана, циркония, ниобия и магния. Такие покрытия обладают высокими биоактивными и антибактериальными свойствами, что делает их пригодными для использования на имплантатах для остеосинтеза.

Также методом микродугового оксидирования получают диэлектрические покрытия на медицинских инструментах, например биполярных зажимах в эндохирургии. Это позволяет улучшить износостойкие, теплостойкие, коррозионностойкие и электроизоляционные качества материала, а также увеличить срок службы инструмента.

Еще одна область применения биосовместимых покрытий – создание силикатных и силикатно-фосфатных покрытий на поверхности магниевых сплавов $Mg0.8Ca$. Такие покрытия используют в травматологии, ортопедии и челюстно-лицевой хирургии.

Потребность практической медицины в биосовместимых КФ покрытиях может быть удовлетворена наличием большой номенклатуры покрытий с различными структурой, составом и свойствами. КФ биопокрытия должны быть биологически совместимыми с тканями организма, коррозионно-устойчивыми в биологической среде и иметь высокую адгезионную прочность с материалом основы. Эта проблема может быть решена применением различных методов формирования покрытий. При выборе метода формирования покрытия на имплантате необходимо учитывать область его применения. Для реконструктивной хирургии представляют интерес КФ покрытия, усиливающие способность имплантатов к остеоинтеграции с костной тканью.

Требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам биосовместимых покрытий, применяемых в изделиях медицинского назначения:

- 1) нетоксичность. Покрытие должно соответствовать требованиям нормативной документации для медицинских изделий класса 2a¹;
- 2) биосовместимость покрытий (регулируется межгосударственным стандартом ISO 10993-1²) и остеосинтез [8];
- 3) устойчивость к воздействию изменения температуры среды. Образцы с МДО-покрытием должны выдерживать испытания в диапазоне от –65 до +300 °С, при этом разрушения покрытия не должно наблюдаться;
- 4) защита от образования и воздействия плесени;
- 5) отсутствие вздутий и отслаивания покрытия. Это проверяется при качественных исследованиях прочности сцепления МДО-покрытий на напыленных поверхностях;
- 6) также к требованиям относится экологичность процесса, так как электролиты не должны содержать сильных кислот, дорогостоящих и вредных химических компонентов.

Развитие поверхности образцов титана методом микродугового оксидирования так же, как и на образцах из алюминиевого сплава, позволяет достичь требуемых параметров пористости [9].

¹ ГОСТ ISO 13485–2017. Изделия медицинские. Системы менеджмента качества. Требования для целей регулирования.

² ГОСТ ISO 10993-1–2021. Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 1. Оценка и исследования в процессе менеджмента риска.

При получении МДО-покрытий на титане проводилась, во-первых, подготовка поверхностей:

1) обезжиривание в органическом растворителе с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ);

2) травление в растворе серной кислоты H_2SO_4 в течение 5 мин;

3) активация в молочной кислоте NaF также проводилась в течение 5 мин.

Во-вторых, МДО-обработка титана проводилась в электролите, содержащем 5 г/л гидроксида натрия NaOH, 3 г/л персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$; 10 г/л сульфата натрия Na_2SO_4 и 5 г/л сульфата магния $MgSO_4$.

Электролит, применяемый для формирования покрытия на титане, не является токсичным за счет малой концентрации, а также слабой токсичности его отдельных компонентов.

Для исследования морфологии поверхности так же, как и при исследовании топологии поверхности на образцах алюминия, был применен растровый электронный микроскоп (РЭМ) VEGA 3 TESCAN. Рисунок 2 демонстрирует топологию поверхности титана, которая была получена методом микродугового оксидирования.

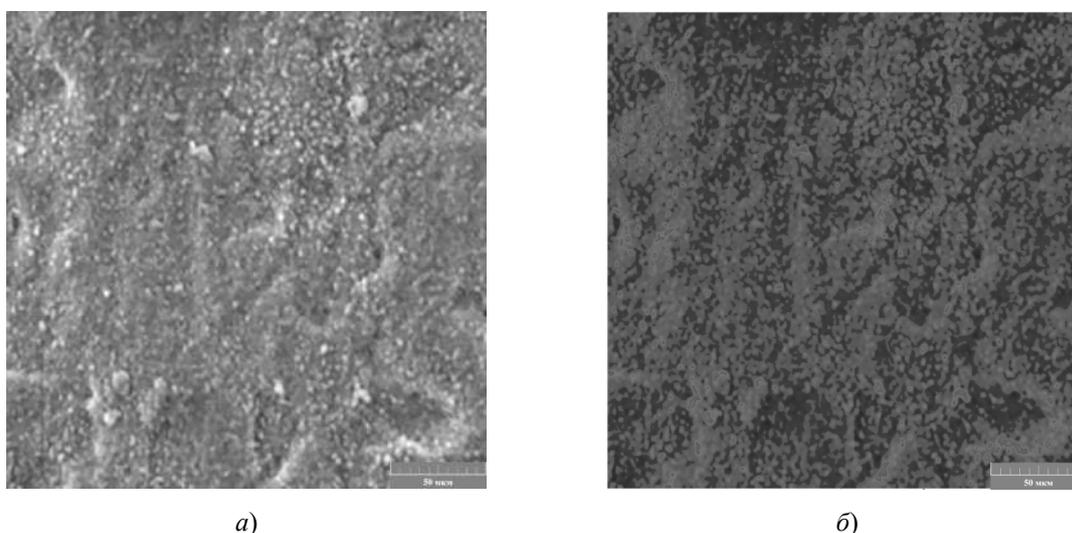


Рис. 2. Морфология поверхности МДО-покрытия, полученного на титане:

a – исходное изображение МДО-покрытия; *б* – изображение МДО-покрытия после обработки ПО

Таблица 2

Значение пористости оксидного покрытия на образцах титана

Сквозная пористость, P_{skvoz} , %	Поверхностная пористость, P_{poverh} , %	Общая пористость, P_{obsh} , %
26,67	23,21	50,88

На рис. 2, *б* темными оттенками показана сквозная пористость, светлыми – поверхностная. Полученные численные значения пористости оксидного покрытия (табл. 2), сформированного на титане методом микродугового оксидирования, соответствуют требованиям пористости биоактивных покрытий и находятся в требуемом диапазоне (от 50 до 70 %).

Исследования топологии поверхности покрытий, полученные на образцах из сплава титана, демонстрируют преобладание сквозных пор, что благоприятно сказывается на покрытиях, предназначенных для использования в медицине, в частности, изделиях медицинского назначения. Кроме того, в сквозных порах может содержаться большое количество лекарственных препаратов [10], что позволит увеличить приживляемость МДО-покрытий в организме человека и животных.

Сравнительный анализ требований к МДО-покрытиям

Ниже приведены результаты сравнения эксплуатационных свойств оксидных покрытий, получаемые методом микродугового оксидирования, в зависимости от области применения: авиакосмической промышленности, машиностроении, изделиях медицинского назначения (табл. 3).

Сравнительная таблица эксплуатационных свойств
МДО-покрытий по отраслям промышленности

Показатели	Область использования		
	авиакосмическая промышленность	машиностроение	изделия медицинского назначения
Толщина, мкм	5–75	5–100	10–50
Микротвердость, HV	≥1500	800–2000	1000–2500
Пористость, %	10–20	5–40	50–70
Сопротивление к износу, мг	<2	<5	<3
Коррозионная стойкость, часы	>500	>1000	>48
Биосовместимость	–	–	ISO 10993–1
Температурный диапазон эксплуатации, °C	–60 до +300	–40 до +150	–40 до +150

Таким образом, в зависимости от областей применения, к высокопрочным керамическим покрытиям, формируемым посредством микродугового оксидирования, предъявляются требования к параметрам качества, а также эксплуатационным (в том числе механическим, термическим, химическим) характеристикам. Понимание специфики каждого из этих направлений подчеркивает необходимость индивидуального подхода к выбору материалов и технологий нанесения покрытий.

В области авиационно-космической промышленности акцент следует делать на повышении термостойкости (от –60 до +300 °C) и коррозионной стойкости (не менее 500 ч), чтобы гарантировать безопасность и надежность в условиях повышенных температур и агрессивных сред. Для транспортной техники критично важны параметры, связанные с износостойкостью (не должно превышать 5 мг), пористостью (варьируемой от 5 до 40 %) и микротвердостью (800 до 2000 по шкале Виккерса), что напрямую влияет на качество, срок службы, а также экономическую составляющую применения изделий.

В медицине, где покрытие должно обеспечивать биосовместимость и износостойкость (не должно превышать 3 мг), требования к качеству становятся особенно строгими. Здесь необходимо учитывать и особые условия стерилизации, а также возможность взаимодействия с биологическими тканями.

Способ получения покрытий методом микродугового оксидирования стал приемлемой платформой для модификации поверхности легких металлов и сплавов. Имеются потребности и предпосылки для дальнейшего поддержания и исследования в отрасли для оптимизации технологического процесса в соответствии с индивидуальными отраслевыми стандартами и требованиями.

Список литературы

1. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraic®: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys // *Surface & Coatings Technology*. 2019. Vol. 369. P. 142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
2. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.
3. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Intelligent automated system of controlled synthesis of ma-coatings // *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. 2019. № 24. P. 96–103.
4. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мартынов А. В. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодеж. науч. конф. Тамбов, 2018*. С. 111–113.
5. Molaei M., Fattah-alhossini A., Nouri M., Nourian A. Systematic optimization of corrosion, bioactivity, and biocompatibility behaviors of calcium-phosphate plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on titanium substrates // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, iss. 5. P. 6322–6337. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.175.
6. Печерская Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и наноэлектроники // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2007. Т. 7, № 2. С. 94–98.
7. Maksov A. A., Gurin S. A., Golubkov P. E. [et al.]. Methods and instruments for measuring surface morphology and mechanical parameters of oxide coatings // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2024. Vol. 17 (3.1). P. 161–167. doi: 10.18721/JPM.173.132

8. Иванов П. В., Макарова Н. И., Булкина Н. В., Зюлькина Л. А. Современные представления об остеоинтеграции дентальных имплантатов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2018. № 4 (48). С. 191–202. doi: 10.21685/2072-3032-2018-4-19
9. Korytkin A. A., Orlinskaya N. Yu., Novikova Ya. S. [et al.]. Biocompatibility and osseointegration of calcium phosphate-coated and non-coated titanium implants with various porosities // Modern technologies in medicine. 2021. Vol. 13, № 2. P. 52–58. doi: 10.17691/stm2021.13.2.06
10. Атрощенко Э.С., Казанцев И. А., Розен А. Е., Голованова Н. В. Область применения и свойства покрытий, получаемых микродуговым окислением // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 3. С. 8–11.

References

1. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultracera[®]: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2019;369:142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
2. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics*. 2019;24(4):363–369. (In Russ.)
3. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. et al. Intelligent automated system of controlled synthesis of ma^o-coatings. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. 2019;(24):96–103.
4. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for analyzing the microarc oxidation process. *Radioelectronics. Problems and prospects of development. Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezh. nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : thesis of the reports of the third All-Russian youth scientific conference*. Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)
5. Molaei M., Fattah-alhossini A., Nouri M., Nourian A. Systematic optimization of corrosion, bioactivity, and biocompatibility behaviors of calcium-phosphate plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on titanium substrates. *Ceramics International*. 2022;48(5):6322–6337. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.175.
6. Pecherskaya E.A. Application of the methodology of functional and metrological analysis to the quality of research of micro- and nanoelectronics materials. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priboroostroeniya = Fundamental problems of radioelectronic instrumentation*. 2007; 7(2):94–98. (In Russ.)
7. Maksov A.A., Gurin S.A., Golubkov P.E. et al. Methods and instruments for measuring surface morphology and mechanical parameters of oxide coatings. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2024;17(3.1):161–167. doi: 10.18721/JPM.173.132
8. Ivanov P.V., Makarova N.I., Bulkina N.V., Zyl'kina L.A. Modern concepts of osseointegration of dental implants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Medical sciences*. 2018;(4):191–202. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3032-2018-4-19
9. Korytkin A.A., Orlinskaya N.Yu., Novikova Ya.S. et al. Biocompatibility and osseointegration of calcium phosphate-coated and non-coated titanium implants with various porosities. *Modern technologies in medicine*. 2021;13(2):52–58. doi: 10.17691/stm2021.13.2.06
10. Atroshchenko E.S., Kazantsev I.A., Rozen A.E., Golovanova N.V. Scope and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*. 1996;(3):8–11. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Анатольевич Максов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: maksov.01@mail.ru

Andrey A. Maksov

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

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Павел Евгеньевич Голубков

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

Олег Андреевич Мельников

инженер-исследователь кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Борис Викторович Чувькин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvykin_bv@mail.ru

Сергей Александрович Потешкин

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

Pavel E. Golubkov

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

Oleg A. Melnikov

Research engineer of the sub-department
of information and measuring
technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Boris V. Chuvykin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey A. Poteshkin

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

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

Поступила в редакцию/Received 25.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 23.12.2024

Принята к публикации/Accepted 13.01.2025

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

УДК 004.946

doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В СОЧЕТАНИИ С ИНТЕРФЕЙСОМ «МОЗГ–КОМПЬЮТЕР» В ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Д. А. Самофалов¹, Д. А. Дегтерев², Д. Н. Печенина³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

^{2,3} Московский клинический научный центр имени А. С. Логинова, Москва, Россия

¹ dmi.samofalov@gmail.com, ² d.degtarev@mknc.ru, ³ darya.pechenina2017@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данного обзора является определение перспектив использования технологий виртуальной реальности в сочетании с интерфейсом «мозг–компьютер» в двигательной реабилитации. Использование технологии виртуальной реальности (VR) в медицине является актуальным направлением, открывающим новые перспективы в диагностике, лечении и реабилитации пациентов. VR охватывает все больше областей медицины и вскоре сможет стать ее неотъемлемой частью, помогающей врачам совершенствовать уже имеющиеся методы диагностики и лечения различных заболеваний. *Материалы и методы.* Представлены существующие разработки, инновационные проекты и исследования в области VR, применяющиеся в медицинском образовании и на практике. Особое внимание уделено использованию технологий VR в нейрореабилитации. *Результаты и выводы.* Приведенные ниже исследования отражают не только востребованность данной технологии в медицине, но и показывают эффективность и превосходство VR над традиционными подходами, VR является стремительно развивающимся трендом в обучении медицинского персонала, благодаря уникальной возможности моделировать реальные ситуации, требующие быстрого и точного реагирования. VR позволяет создавать персонализированные программы реабилитации, например, после острого нарушения мозгового кровообращения и различных травм, обеспечивая пациентам максимальное вовлечение в процесс восстановления.

Ключевые слова: виртуальная реальность, реабилитация, интерфейс «мозг–компьютер», двигательные функции, нейрореабилитация

Для цитирования: Самофалов Д. А., Дегтерев Д. А., Печенина Д. Н. Использование виртуальной реальности в сочетании с интерфейсом «мозг–компьютер» в двигательной реабилитации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 79–89. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

THE USE OF VIRTUAL REALITY IN COMBINATION WITH A BRAIN-COMPUTER INTERFACE IN MOTOR REHABILITATION

D.A. Samofalov¹, D.A. Degterev², D.N. Pechenina³

¹ National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

^{2,3} Moscow Clinical Scientific Center named after A.S. Loginov, Moscow, Russia

¹ dmi.samofalov@gmail.com, ² d.degtarev@mknc.ru, ³ darya.pechenina2017@yandex.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this review is to determine the prospects for using virtual reality technologies in combination with the brain-computer interface in motor rehabilitation. The use of virtual reality technology (hereinafter referred to as VR) in medicine is a relevant area that opens up new prospects in the diagnosis, treatment and

rehabilitation of patients. VR covers more and more areas of medicine and will be able to become its integral part, helping doctors improve the methods of diagnosis and treatment of various diseases that already exist. *Materials and methods.* This review presents existing developments, innovative projects and research in the field of VR used in medical education and practice. *Results and conclusions.* Particular attention is paid to the use of VR technologies in neurorehabilitation. The studies below reflect not only need for this technology in medicine, but also show the effectiveness and superiority of VR over traditional approaches, VR is a rapidly developing trend in the training of medical personnel, due to the unique ability to simulate real situations that require a quick and accurate response. VR allows for the creation of personalized rehabilitation programs, for example, after acute cerebrovascular accident and various injuries, providing patients with maximum involvement in the recovery process.

Keywords: virtual reality, rehabilitation, brain-computer interface, motor functions, neurorehabilitation

For citation: Samofalov D.A., Degterev D.A., Pechenina D.N. The use of virtual reality in combination with a brain-computer interface in motor rehabilitation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):79–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-10

Введение

Медицина как наука и практика всегда стремилась к инновациям и совершенствованию методов диагностики, лечения и реабилитации. В последние десятилетия виртуальная реальность (далее – VR) прошла эволюцию от футуристической концепции к важнейшему инструменту в арсенале современной медицины. VR, изначально созданная для сферы развлечений и игр, выросла до целого медицинского направления. В настоящее время принципы VR используются в медицинском образовании, хирургии, психиатрии и реабилитации. С развитием технологий и увеличением их доступности возможности применения VR в медицине растут.

В данном обзоре рассмотрены различные способы применения VR в здравоохранении, включая обучение медицинских специалистов, создание диагностических систем, проведение реабилитации и повышение качества жизни пациентов.

Двигательная реабилитация играет определяющую роль в лечении пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) и различные травмы. Объединение VR с интерфейсом «мозг–компьютер» (далее – ИМК) стало новым словом в двигательной реабилитации неврологических заболеваний.

Целью данного обзора является определение перспектив развития технологий VR и ИМК в двигательной реабилитации.

Области применения виртуальной реальности в медицине

Технологии VR активно используются в процессе обучения и оценки медицинских знаний, позволяя получить практический опыт еще до начала клинической практики. Это особенно необходимо в сфере здравоохранения, где цена совершения ошибки высока. Кроме того, при использовании данных технологий сокращается время обучения и улучшаются визуально-пространственные навыки [1, 2].

Результаты многочисленных исследований показали, что система обучения анатомии человека с визуализацией VR позволяет студентам лучше понимать трехмерные структуры, повышает их уровень вовлеченности в процесс обучения и эффективнее традиционных способов обучения [3–5]. С помощью VR обучающиеся могут неоднократно практиковать навыки выполнения технических манипуляций, способы реагирования в экстренных ситуациях, а также отрабатывать навыки общения с пациентами [6].

По данным исследования Heinrich et al. (2021), при использовании VR улучшились объективные показатели производительности обучения без увеличения времени выполнения задач, сократилась частота совершения медицинских ошибок [7]. Еще одним примером использования VR является разработанная в США в 2020 г. на базе Западного университета медицинских наук «виртуальная операционная», которая позволяет студентам получать базовые знания и навыки в области операционной хирургии в менее стрессовой среде без риска для здоровья пациентов [8]. В 2019 г. Van Duren et al. разработали цифровой симулятор рентгеноскопической визуализации с использованием ортогональных камер для отслеживания цветных маркеров, прикрепленных к проводнику, что создает виртуальное наложение на рентгеноскопические изображения моделей тазобедренного сустава. Результаты данного исследования показали высокую эффективность применения цифрового симулятора при обучении студентов [9]. В Испании используется 3D-симулятор дополненной реальности с тактильной обратной связью в качестве

учебного инструмента для размещения торакальных транспедикулярных винтов. Проведенные исследования выявили улучшение точности работы в среднем на 15 %, что указывает на преимущества использования VR для обучения ординаторов и хирургов [10].

В настоящее время VR успешно применяется в планировании и проведении хирургических операций. Исследования демонстрируют высокий потенциал объединения КТ, МРТ и рентгенологических снимков с реальными изображениями пациентов для проведения более точных хирургических манипуляций [11]. Данные технологии увеличивают скорость, повышают точность действий и снижают вероятность совершения хирургом интраоперационных ошибок [12–14]. Кроме того, они позволяют визуализировать индивидуальную анатомию пациента в режиме реального времени и получать дополнительную информацию о пациенте, что улучшает предоперационное планирование и облегчает процесс проведения хирургических операций [15].

С 2017 г. на базе Стэнфордского университета функционирует лаборатория неврологического моделирования. Программное обеспечение создает трехмерную модель мозга, созданную с помощью изображений МРТ, компьютерной томографии и ангиограмм, что позволяет визуализировать точное местоположение опухоли или аневризмы [16]. В Израиле разработана специализированная система для хирургов на базе технологии виртуальной реальности Surgical Theater, позволяющая нейрохирургам с большой точностью планировать конкретные операции. Данная платформа также успешно используется в 15 ведущих больницах США [17]. С помощью хирургических роботов da Vinci, использующих VR, в России к 2021 г. было проведено более 20 000 операций. В настоящее время системы da Vinci присутствуют в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Уфе, Тюмени и нескольких других городах Российской Федерации [18, 19].

Технологии VR также используются в лечении психических расстройств как самостоятельно, так и в совокупности с традиционными методами. Одним из примеров реализации данной технологии является проект компании «Virtually Better» (США), комплекс терапии психических расстройств состоит из настраиваемой среды виртуальной реальности, тактильной платформы, которые создают спектр стимулов, ассоциированных с моделируемой ситуацией [20]. Программное обеспечение адаптировано для работы с различными состояниями пациента, фобиями, а также с особенностями детского психологического развития.

Для терапии посттравматического стрессового расстройства используется платформа "Amelia Virtual Care platform" (Испания), включающая в себя систему датчиков, шлем виртуальной реальности, а также программное обеспечение, реализующее различные сценарии для терапии широкого спектра психических расстройств [21].

В одном из последних исследований Zhang et al. (2020) в Китае был выявлен положительный эффект влияния терапии с использованием технологий виртуальной реальности при лечении тревожных расстройств в рамках фобии заболеть COVID-19 [22].

В настоящее время в Российской Федерации и в мире VR активно используется в сфере медицинской реабилитации. С каждым годом появляется все больше программных комплексов и технологических продуктов, позволяющих повысить эффективность реабилитации пациентов, перенесших ОНМК, и увеличить подвижности конечностей после различных травм. Одним из примеров использования подобных технологий является продукт российской компании «Исток-Аудио» (Московская область) – программный комплекс «Девирта-Делфи», предназначенный для лечения и реабилитации пациентов с двигательными и когнитивными нарушениями после травм, операций и ОНМК [23].

Также существуют аппаратные комплексы, использующие VR для реабилитации лиц с нарушением локомоторных функций конечностей. Одним из них является тренажер для постинсультной реабилитации «ReviVR», производимый ООО «Прототип» (г. Самара) [24].

Одним из наиболее перспективных проектов в данной отрасли является программно-аппаратный комплекс «VR GO» (г. Томск) для реабилитации после ОНМК, в основе которого лежит принцип ассоциации реального и виртуального движения между человеком и его цифровым аватаром, позволяющий ускорить процесс реабилитации и дающий возможность осуществлять ее в домашних условиях [25].

Эффективность использования VR при нейрореабилитации активно оценивается российскими и зарубежными учеными. Так, результаты исследования М. В. Долганова и соавт. (2019) по эффективности применения VR при постинсультном парезе показывали, что включение короткого курса тренировок с применением данных технологий улучшает функцию верхней

конечности у пациентов в острый период ОНМК. Также у пациентов отмечалось улучшение стато-локомоторной функции уже на шестой день занятий [26].

Использование VR благоприятно сказывается и на восстановлении двигательных функций у пациентов в остром периоде ОНМК. Участники исследования М. В. Долганова и соавт. (2019) по окончании реабилитационных мероприятий продемонстрировали достоверно значимое улучшение функции верхней конечности и активности в повседневной жизни [26].

Использование виртуальной реальности и интерфейса «мозг–компьютер», как метод восстановления двигательной функции верхних конечностей

Использование VR в нейрореабилитации открывает новые горизонты для медицинской практики, преодолевая ограничения традиционных методов. Согласно работе А. Е. Хижниковой и соавт. (2016), существующие системы VR, применяемые в двигательной реабилитации, можно разделить на два больших класса: настольные и иммерсионные [27]. Первый класс предполагает погружение в реальность через экран компьютера с использованием джойстика, мыши или специальной перчатки для управления, второй – использование шлема виртуальной реальности с полным погружением с возможностью управления посредством перчатки или костюма, в том числе с биологической обратной связью, например использование ИМК.

По данным мета-обзора Chen J. et al. (2022) 42 публикаций, описывающих эффективность использования VR в локомоторной реабилитации верхних конечностей после перенесенных инсультов (совокупная выборка составила 1893 респондента), наблюдались значительные различия в ловкости рук, спастичности по шкале Эшворта, двигательной способности рук и кистей по сравнению с группой контроля [28].

Мета-анализ Rutkowski S. et al. (2020), включающий в себя 17 исследований, показал, что результаты реабилитации по шкале Фугль – Мейера были значительно выше у пациентов, проходивших VR-реабилитацию в дополнение к классической терапии, по сравнению с контрольной группой [29].

В рамках анализа эффективности реабилитации нижних конечностей после инсульта с использованием технологий VR проведен мета-анализ 12 исследований Kos A. et al. (2023) [30–33]. Выявлено, что кроме положительного воздействия на двигательную активность, у пациентов наблюдалось повышение мотивации к прохождению курсов реабилитации и снижение уровней депрессии в среднесрочном периоде.

Ю. Ю. Некрасова и соавторы (2021, 2022) также проводили клинические исследования с применением VR в реабилитации после ОНМК и повреждений головного мозга [34, 35]. Во всех экспериментах были выявлены следующие положительные эффекты применения VR-технологий: активное вовлечение пациентов в процесс выполнения упражнений, улучшение когнитивных функций и снижение уровня депрессии [36] (рис. 1).



Рис. 1. Стимуляция с помощью VR в отделении реабилитации и интенсивной терапии

Широкое внедрение в последние годы получил ИМК. Данная технология основана на электроэнцефалографии: специальный аппарат регистрирует электрическую активность

мозга и переводит ее в команды для управления устройствами. ИМК могут использоваться в обучении, улучшая когнитивные способности, память и скорость реакции [37, 38] (рис. 2).



Рис. 2. Выполнение реабилитационных упражнений с помощью экзоскелета «Экзокисть-3», управляемого через ИМК

Также особую роль ИМК играет в расширении коммуникативных возможностей людей с ограниченными возможностями здоровья, в том числе с такими расстройствами, как боковой амиотрофический склероз [39–41]. Кроме того, одним из возможных способов использования ИМК является управление протезами, инвалидными колясками и мобильными устройствами связи [36, 42, 46]. В контексте двигательной реабилитации ИМК может использоваться для управления виртуальными объектами. ИМК представляет собой технологию, позволяющую преобразовывать данные об активности головного мозга в управляющее воздействие на объект управления [34, 43–45]. Данным авторским коллективом проводилось сравнительное исследование применения ИМК в двигательной реабилитации пациентов на раннем восстановительном периоде в двух вариантах: совместно с роботизированной терапией (экзоскелет) и без нее. Как отмечают авторы: «Лечение продолжалось 4 недели, и по его окончании эффективность терапии была сопоставима в обеих группах, однако через 12 недель от начала лечения в группе ИМК+МГТ Manus у большего количества больных (63,6 %) отмечалось дальнейшее улучшение двигательных функций в руке по сравнению с контрольной группой, в которой дальнейшее улучшение наблюдалось только у 35,7 %».

Обсуждение

К очевидным преимуществам использования ВР в сочетании с ИМК в двигательной реабилитации относятся:

1. Индивидуальная настройка.

ИМК позволяет персонализировать реабилитационные программы в зависимости от потребностей каждого пациента. Анализ активности мозга может помочь определить области, которые требуют особого внимания.

2. Мотивация и заинтересованность.

ВР создает интересные и визуально привлекательные пространства для реабилитации, что помогает пациентам оставаться мотивированными и увлеченными процессом.

3. Анализ и мониторинг.

Данные, собранные с помощью ВР и ИМК, могут быть использованы для непрерывного мониторинга и оценки прогресса пациента в реабилитации. Это позволяет адаптировать программы лечения в реальном времени.

Внедрение технологий ВР и ИМК в реабилитацию предоставляет многообещающие перспективы, однако сопряжено с рядом ограничений:

1. Высокие затраты на оборудование и разработку.

Приобретение специализированных гарнитур ВР и ИМК, а также разработка индивидуальных программ и симуляций может быть дорогостоящим процессом. Многие медицинские

учреждения и пациенты могут столкнуться с финансовыми ограничениями, что затрудняет доступность этих технологий.

2. Необходимость специализированной подготовки.

Внедрение ВР и ИМК требует обучения медицинского персонала и пациентов в использовании этой технологии. Это может быть вызовом, особенно для старшего поколения врачей и пациентов или тех, кто не имеет опыта работы с современными мобильными устройствами.

3. Недостаток научных исследований и стандартизации.

В настоящее время существует недостаток обширных научных исследований, подтверждающих эффективность ВР и ИМК в реабилитации. Недостаток стандартов и регулирования также может ограничить широкое внедрение данных технологий.

4. Необходимость интеграции с традиционными методами реабилитации.

Для успешного внедрения ВР и ИМК в реабилитацию необходимо интегрировать их с традиционными методами лечения и реабилитации. Это может потребовать изменений в протоколах лечения.

5. Индивидуальные ограничения и особенности пациентов.

Некоторые пациенты могут иметь физические или когнитивные ограничения, которые делают использование ВР и ИМК невозможным или затруднительным. Для таких случаев необходимы альтернативные методы реабилитации.

Заключение

Сочетание ВР и ИМК представляет мощный инструмент для двигательной реабилитации. Использование данных технологий в реабилитации повышает уровень персонализации, мотивацию пациентов, а также обеспечивает более точный мониторинг состояния пациента. В связи с вышеперечисленными сложностями внедрения данных технологий необходимо продолжить клинические исследования на базе отделений реабилитации медицинских учреждений, включая национальные медицинские исследовательские центры. Для внедрения подобных технологий в медицинскую практику потребуются создание междисциплинарных рабочих групп с привлечением как врачей-реабилитологов, неврологов, физиотерапевтов, так и специалистов в области биофизики, анализа данных и искусственного интеллекта. Существующим продуктам в данной области потребуются не только получение различных патентов, но и прохождение всех этапов сертификации для получения регистрационного удостоверения на медицинское изделие.

В перспективе 5–10 лет ожидается дальнейшее развитие и интеграция технологий ВР и ИМК в медицинскую практику, что позволит повысить эффективность восстановления двигательных функций у пациентов, перенесших инсульт, травмы позвоночника или другие заболевания, ассоциированные с частичной утратой локомоторных функций.

Список литературы

1. Bernardo A. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training // World Neurosurgery. 2017. Vol. 106. P. 1015–1029.
2. Dang B. K., Palicte J. S., Valdez A., O'Leary-Kelley C. Assessing Simulation, Virtual Reality, and Television Modalities in Clinical Training // Clinical Simulation in Nursing. 2018. Vol. 19. P. 30–37.
3. Moro C., Stromberga Z., Raikos A., Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy // Anatomical Sciences Education. 2017. Vol. 10, № 6. P. 549–559.
4. Chytas D., Johnson E. O., Piagkou M. [et al.]. The role of augmented reality in Anatomical education: An overview // Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger. 2020. Vol. 229. P. 151463.
5. Kurniawan M. H., Suharjo D., Witjaksono G. Human Anatomy Learning Systems Using Augmented Reality on Mobile Application // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 135. P. 80–88.
6. Duarte M. L., Santos L. R., Guimarras Junior J. B., Peccin M. S. Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review // Morphologie: Bulletin De l'Association Des Anatomistes. 2020. Vol. 104, № 347. P. 254–266.
7. Kempton S. J., Salyapongse A. N., Israel J. S., Mandel B. A. Surgical Education Module Improves Operative Proficiency in Endoscopic Carpal Tunnel Release: A Blinded Randomized Controlled Trial of Trainees // Journal of Surgical Education. 2018. Vol. 75, № 2. P. 442–449.
8. Heinrich F., Huettl F., Schmidt G. [et al.]. HoloPointer: a virtual augmented reality pointer for laparoscopic surgery training // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2021. T. 16. № 1. P. 161–168.
9. Labovitz J., Hubbard C. The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education // Clinics in Podiatric Medicine and Surgery. 2020. Vol. 37, № 2. P. 409–420.

10. Duren van B. H., Sugand K., Wescott R. [et al.]. Augmented reality fluoroscopy simulation of the guide-wire insertion in DHS surgery: A proof of concept study // *Medical Engineering & Physics*. 2018. Vol. 55. P. 52–59.
11. Alaraj A., Lemole M. G., Finkle J. H. [et al.]. Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications // *Surgical Neurology International*. 2011. Vol. 2. P. 52.
12. Rahul K., Raj V. P. D., Srinivasan K. [et al.]. A Study on Virtual and Augmented Reality in Real-Time Surgery // *IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW) 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW)*. 2019. P. 1–2.
13. Ghaednia H., Fourman M. S., Lans A. [et al.]. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials // *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*. 2021. Vol. 21, № 10. P. 1617–1625.
14. Intra-operative augmented reality in distal locking | Semantic Scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intra-operative-augmented-reality-in-distal-locking-Londei-Esposito/968985e4c3976494598c091dffa283e1fa845a3d> (дата обращения: 14.12.2023).
15. Tsukada S., Ogawa H., Nishino M. [et al.]. Augmented reality-based navigation system applied to tibial bone resection in total knee arthroplasty // *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2019. Vol. 6. P. 44.
16. Goh G. S., Lohre R., Parvizi J., Goel D. P. Virtual and augmented reality for surgical training and simulation in knee arthroplasty // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2021. Vol. 141, № 12. P. 2303–2312.
17. Virtual Human Interaction Lab. URL: <https://vhil.stanford.edu/> (дата обращения: 15.12.2023).
18. Virtual Reality for Surgery | Precision XR. URL: <https://surgicaltheater.com/> (дата обращения: 14.12.2023).
19. Робот да Винчи: хирурги, клиники, отзывы, преимущества, лечение. URL: <https://robot-davinci.ru/> (дата обращения: 14.12.2023).
20. Мурашко А. А. Возможности применения виртуальной реальности в психиатрии // *Социальная и клиническая психиатрия*. 2021. Т. 31, № 2. С. 101–105.
21. Virtually Better | Emory University | Atlanta GA. URL: <https://ott.emory.edu/about/success/virtuallybetter.html> (дата обращения: 14.12.2023).
22. VR Software for Mental Health Professionals' Therapy. URL: <https://ameliavirtualcare.com/> (дата обращения: 14.12.2023).
23. Zhang W., Paudel D., Shi R. [et al.]. Virtual Reality Exposure Therapy (VRET) for Anxiety Due to Fear of COVID-19 Infection: A Case Series // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2020. Vol. 16. P. 2669–2675.
24. Программа виртуальной нейрореабилитации для восстановления функций верхних и нижних конечностей «Девирта – Делфи» – купить по выгодной цене в Москве в ГК «Исток-Аудио». URL: https://www.istok-audio.com/catalog/product/virtualnaya_reabilitatsiya_devirta (дата обращения: 14.12.2023).
25. Тренажер для пассивной реабилитации ReviVR. URL: <https://revi.life/products/revivr/> (дата обращения: 15.12.2023).
26. VR GO – О нас. URL: <https://vrgo.team/about> (дата обращения: 14.12.2023).
27. Долганов М. В., Карпова М. И. Эффективность применения технологий виртуальной реальности при постинсультном парезе верхней конечности // *Пермский медицинский журнал*. 2018. Т. 35, № 1. С. 60–67. doi: 10.17816/pmj35160-67
28. Хижникова А. Е., Ключков А. С., Котовсмоленский А. М. [и др.]. Виртуальная реальность как метод восстановления двигательной функции руки // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2016. № 3. С. 5–11.
29. Chen J., Or C. K., Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials // *Journal of Medical Internet Research*. 2022. Vol. 24, № 6, P. e24111.
30. Mane R., Wu Z., Wang D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review // *Stroke and Vascular Neurology*. 2022. Vol. 7, № 6. P. 541–549.
31. Повереннова И. Е., Захаров А. В., Хивинцева Е. В. [и др.]. Предварительные результаты исследования эффективности использования методики виртуальной реальности для восстановления двигательной функции нижних конечностей у пациентов в остром периоде инсульта // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2019. № 15. С. 172–176.
32. Aramaki A. L., Sampaio R. F., Cavalcanti A. Dutra FCMSE. Use of client-centered virtual reality in rehabilitation after stroke: a feasibility study // *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*. 2019. Vol. 77, № 9. P. 622–631. doi: 10.1590/0004-282X20190103
33. Zhang B., Li D., Liu Y. [et al.]. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Advanced Nursing*. 2021. Vol. 77, № 8. P. 3255–3273. doi: 10.1111/jan.14800
34. Rutkowski S., Kiper P., Cacciante L. [et al.]. Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020. Vol. 52, № 11. P. jrm00121.

35. Некрасова Ю. Ю., Воронцова В. С., Канарский М. М. [и др.]. Применение технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации. Медико-биологические, клинические и социальные вопросы здоровья и патологии человека : VII Всерос. науч. конф. студентов и молодых ученых с международным участием (г. Иваново, 6 апреля 2021 г.). Иваново : Ивановская государственная медицинская академия, 2021. С. 60–62.
36. Гунделах Ф. В., Станкевич Л. А., Соськин К. М. Применение интерфейсов «мозг-компьютер» в ассистивных технологиях // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19, № 2. С. 277–301. doi: 10.15622/sp.2020.19.2.2
37. Петриков С. С., Гречко А. В., Щелкунова И. Г. [и др.]. Новые перспективы двигательной реабилитации пациентов после очагового поражения головного мозга // Вопросы нейрохирургии имени Н. Н. Бурденко. 2019. № 83. С. 90–99. doi: 10.17116/neiro20198306190
38. Крючков Ю. А., Щуковский Н. В., Шоломов И. И. Применение интерфейса «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» в реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта // Ульяновский медико-биологический журнал. 2019. № 33. С. 8–16.
39. Погонченкова И. В., Костенко Е. В., Петрова Л. В. Интерфейс мозг-компьютер с экзоскелетом кисти: новые возможности реабилитации // Московская медицина. 2022. № 4. С. 20–25.
40. Ларина Н. В., Корсунская Л. Л., Власенко С. В. Комплекс «Экзокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг-компьютер» // Нервно-мышечные болезни. 2019. № 9. С. 44–50.
41. Карякин Н. Н., Шейко Г. Е., Воловик М. Г., Белова А. Н. Технологии виртуальной реальности в комплексной медицинской реабилитации пациентов с детским церебральным параличом // Бюллетень сибирской медицины. 2020. № 19 (2). С. 142–152. doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-142–152
42. Massetti T, da Silva T. D., Crocetta T. B. [et al.]. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review // Journal of Central Nervous System Disease. 2018. Vol. 10. doi: 10.1177/1179573518813541
43. Сорокина В. С., Некрасова Ю. Ю., Штерн М. В. [и др.]. Применение технологии виртуальной реальности для психологической реабилитации пациентов после повреждений головного мозга // Виртуальные технологии в медицине. 2022. № 1. С. 26–30.
44. Люкманов Р. Х., Черникова Л. А., Мокиенко О. А. Интерфейс мозг-компьютер: первый опыт клинического применения в России // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 1. С. 31–39. doi: 10.7868/S0131164616010136
45. Flesher S. N., Downey J. E., Weiss J. M. [et al.]. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control // Science. 2021. Vol. 372, № 6544. P. 831–836.
46. Канарский М. М., Некрасова Ю. Ю., Борисов И. В. [и др.]. VR-технологии в нейрореабилитации // Вестник Всероссийского общества специалистов по медико-социальной экспертизе, реабилитации и реабилитационной индустрии. 2021. № 1. С. 59–70. doi: 10.17238/issn1999-2351.2021.1.59-70

References

1. Bernardo A. Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training. *World Neurosurgery*. 2017;106:1015–1029.
2. Dang B.K., Palicte J.S., Valdez A., O’Leary-Kelley C. Assessing Simulation, Virtual Reality, and Television Modalities in Clinical Training. *Clinical Simulation in Nursing*. 2018;19:30–37.
3. Moro C., Stromberga Z., Raikos A., Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical Sciences Education*. 2017;10(6):549–559.
4. Chytas D., Johnson E. O., Piagkou M. et al. The role of augmented reality in Anatomical education: An overview. *Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger*. 2020;229:151463.
5. Kurniawan M.H., Suharjito D., Witjaksono G. Human Anatomy Learning Systems Using Augmented Reality on Mobile Application. *Procedia Computer Science*. 2018;135:80–88.
6. Duarte M.L., Santos L.R., Guimargues Junior J.B., Peccin M.S. Learning anatomy by virtual reality and augmented reality. A scope review. *Morphologie: Bulletin De l’Association Des Anatomistes*. 2020; 104(347): 254–266.
7. Kempton S.J., Salyapongse A.N., Israel J.S., Mandel B.A. Surgical Education Module Improves Operative Proficiency in Endoscopic Carpal Tunnel Release: A Blinded Randomized Controlled Trial of Trainees. *Journal of Surgical Education*. 2018;75(2):442–449.
8. Heinrich F., Huettl F., Schmidt G. et al. HoloPointer: a virtual augmented reality pointer for laparoscopic surgery training. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2021;16(1):161–168.
9. Labovitz J., Hubbard C. The Use of Virtual Reality in Podiatric Medical Education. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*. 2020;37(2):409–420.
10. Duren van B.H., Sugand K., Wescott R. et al. Augmented reality fluoroscopy simulation of the guide-wire insertion in DHS surgery: A proof of concept study. *Medical Engineering & Physics*. 2018;55:52–59.

11. Alaraj A., Lemole M.G., Finkle J.H. et al. Virtual reality training in neurosurgery: Review of current status and future applications. *Surgical Neurology International*. 2011;2:52.
12. Rahul K., Raj V.P.D., Srinivasan K. et al. A Study on Virtual and Augmented Reality in Real-Time Surgery. *IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW) 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan (ICCE-TW)*. 2019:1–2.
13. Ghaednia H., Fourman M.S., Lans A. et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*. 2021;21(10):1617–1625.
14. *Intra-operative augmented reality in distal locking / Semantic Scholar*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intra-operative-augmented-reality-in-distal-locking-Londei-Esposito/968985e4c3976494598c091dffa283e1fa845a3d> (accessed 14.12.2023).
15. Tsukada S., Ogawa H., Nishino M. et al. Augmented reality-based navigation system applied to tibial bone resection in total knee arthroplasty. *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2019;6:44.
16. Goh G.S., Lohre R., Parvizi J., Goel D.P. Virtual and augmented reality for surgical training and simulation in knee arthroplasty. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2021;141(12):2303–2312.
17. *Virtual Human Interaction Lab*. Available at: <https://vhil.stanford.edu/> (accessed 15.12.2023).
18. *Virtual Reality for Surgery | Precision XR*. Available at: <https://surgicaltheater.com/> (accessed 14.12.2023).
19. *Robot da Vinci: khirurgi, kliniki, otzyvy, preimushchestva, lechenie = The Da Vinci robot: surgeons, clinics, reviews, benefits, treatment*. (In Russ.). Available at: <https://robot-davinci.ru/> (accessed 14.12.2023).
20. Murashko A.A. Possibilities of using virtual reality in psychiatry. *Sotsial'naya i klinicheskaya psikiatriya = Social and clinical psychiatry*. 2021;31(2):101–105. (In Russ.)
21. *Virtually Better | Emory University | Atlanta GA*. Available at: <https://ott.emory.edu/about/success/virtuallybetter.html> (accessed 14.12.2023).
22. *VR Software for Mental Health Professionals' Therapy*. Available at: <https://ameliavirtualcare.com/> (accessed 14.12.2023).
23. Zhang W., Paudel D., Shi R. et al. Virtual Reality Exposure Therapy (VRET) for Anxiety Due to Fear of COVID-19 Infection: A Case Series. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2020;16:2669–2675.
24. *Programma virtual'noy neyroreabilitatsii dlya vosstanovleniya funktsiy verkhnikh i nizhnikh konechnostey «Devirta – Delfi» – kupit' po vygodnoy tsene v Moskve v GK «Istok-Audio» = Virtual neurorehabilitation program for restoring the functions of the upper and lower extremities "Devirta – Delphi" – buy at a bargain price in Moscow at Istok-Audio Group*. (In Russ.). Available at: https://www.istok-audio.com/catalog/product/virtualnaya_reabilitatsiya_devirta (accessed 14.12.2023).
25. *Trenazher dlya passivnoy reabilitatsii ReviVR = ReviVR Passive Rehabilitation Simulator*. (In Russ.). Available at: <https://revi.life/products/revivr/> (accessed 15.12.2023).
26. *VR GO – O nas*. (In Russ.). Available at: <https://vrgo.team/about> (accessed 14.12.2023).
27. Dolganov M.V., Karpova M.I. The effectiveness of using virtual reality technologies in post-stroke paresis of the upper limb. *Permskiy meditsinskiy zhurnal = Perm Medical Journal*. 2018;35(1):60–67. (In Russ.). doi: 10.17816/pmj35160-67
28. Khizhnikova A.E., Klochkov A.S., Kotovsmolenskiy A.M. et al. Virtual reality as a method of restoring the motor function of the hand. *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii = Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2016;(3):5–11. (In Russ.)
29. Chen J., Or C.K., Chen T. Effectiveness of Using Virtual Reality-Supported Exercise Therapy for Upper Extremity Motor Rehabilitation in Patients With Stroke: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Medical Internet Research*. 2022;24(6):e24111.
30. Mane R., Wu Z., Wang D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review. *Stroke and Vascular Neurology*. 2022;7(6):541–549.
31. Poverennova I.E., Zakharov A.V., Khivintseva E.V. et al. Preliminary results of a study on the effectiveness of using virtual reality techniques to restore the motor function of the lower extremities in patients with acute stroke. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal = Saratov Scientific and Medical Journal*. 2019;(15):172–176. (In Russ.)
32. Aramaki A.L., Sampaio R.F., Cavalcanti A. Dutra FCMSE. Use of client-centered virtual reality in rehabilitation after stroke: a feasibility study. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*. 2019;77(9):622–631. doi: 10.1590/0004-282X20190103
33. Zhang B., Li D., Liu Y. et al. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Advanced Nursing*. 2021;77(8):3255–3273. doi: 10.1111/jan.14800
34. Rutkowski S., Kiper P., Cacciante L. et al. Use of virtual reality-based training in different fields of rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020; 52(11):jrm00121.
35. Nekrasova Yu.Yu., Vorontsova V.S., Kanarskiy M.M. et al. Application of virtual reality technology in complex medical rehabilitation. *Mediko-biologicheskie, klinicheskie i sotsial'nye voprosy zdorov'ya i patologii cheloveka: VII Vseros. nauch. konf. studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym*

- uchastiem (g. Ivanovo, 6 aprelya 2021 g.) = Biomedical, clinical and social issues of human health and pathology : VII All-Russian Scientific Conference of Students and Young Scientists with international participation (Ivanovo, April 6, 2021). Ivanovo: Ivanovskaya gosudarstvennaya meditsinskaya akademiya, 2021:60–62. (In Russ.)*
36. Gundelakh F.V., Stankevich L.A., Son'kin K.M. The use of "brain-computer" interfaces in assistive technologies. *Trudy SPIIRAN = Proceedings of SPIIRAN*. 2020;19(2):277–301. (In Russ.). doi: 10.15622/sp.2020.19.2.2
 37. Petrikov S.S., Grechko A.V., Shchelkunova I.G. et al. New prospects for motor rehabilitation of patients after focal brain damage. *Voprosy neyrokhirurgii imeni N.N. Burdenko = Issues of neurosurgery named after N.N. Burdenko*. 2019;(83):90–99. (In Russ.). doi: 10.17116/neiro20198306190
 38. Kryuchkov Yu.A., Shchukovskiy N.V., Sholomov I.I. The use of the BRAIN-COMPUTER interface in the rehabilitation of patients with motor disorders after a stroke. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal = Ulyanovsk Medical and Biological Journal*. 2019;(33):8–16. (In Russ.)
 39. Pogonchenkova I.V., Kostenko E.V., Petrova L.V. Brain-computer interface with hand exoskeleton: new rehabilitation opportunities. *Moskovskaya meditsina = Moscow medicine*. 2022;(4):20–25. (In Russ.)
 40. Larina N.V., Korsunskaya L.L., Vlasenko S.V. The Exokist-2 complex in the rehabilitation of the upper limb in cerebral palsy using a non-invasive brain-computer interface. *Nervno-myshechnye bolezni = Neuromuscular diseases*. 2019;(9):44–50. (In Russ.)
 41. Karyakin N.N., Sheyko G.E., Volovik M.G., Belova A.N. Virtual reality technologies in complex medical rehabilitation of patients with cerebral palsy. *Byulleten' sibirskoy meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2020;19(2):142–152. (In Russ.). doi: 10.20538/1682-0363-2020-2-142–152
 42. Massetti T, da Silva T.D., Crocetta T.B. et al. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review. *Journal of Central Nervous System Disease*. 2018;10. doi: 10.1177/1179573518813541
 43. Sorokina V.S., Nekrasova Yu.Yu., Shtern M.V. et al. Application of virtual reality technology for psychological rehabilitation of patients after brain damage. *Virtual'nye tekhnologii v meditsine = Virtual technologies in medicine*. 2022;(1):26–30. (In Russ.)
 44. Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A., Mokienko O.A. Brain-computer interface: the first experience of clinical application in Russia. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*. 2016;42(1):31–39. doi: 10.7868/S0131164616010136
 45. Flesher S.N., Downey J.E., Weiss J.M. et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. *Science*. 2021;372(6544):831–836.
 46. Kanarskiy M.M., Nekrasova Yu.Yu., Borisov I.V. et al. VR technologies in neurorehabilitation. *Vestnik Vserossiyskogo obshchestva spetsialistov po mediko-sotsial'noy ekspertize, reabilitatsii i reabilitatsionnoy industrii = Bulletin of the All-Russian Society of Specialists in Medical and Social Expertise, rehabilitation and Rehabilitation Industry*. 2021;(1):59–70. (In Russ.). doi: 10.17238/issn1999-2351.2021.1.59-70

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Самофалов

аспирант,
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
(Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1)
E-mail: dmi.samofalov@gmail.com

Dmitriy A. Samofalov

Postgraduate student,
National Research Technological University "MISIS"
(b. 1, 4 Leninskiy avenue, Moscow, Russia)

Даниил Александрович Дегтерев

кандидат медицинских наук, врач-невролог,
заведующий отделением неврологии,
Московский клинический научный
центр имени А. С. Логинова
(Россия, г. Москва, ул. Новогиреевская, 1 корп. 5)
E-mail: d.degterev@mknc.ru

Daniil A. Degterev

Candidate of medical sciences, neurologist,
head of the neurology department,
Moscow Clinical Scientific Center
named after A.S. Loginov
(p. 5, 1 Novogireevskaya street, Moscow, Russia)

Дарья Николаевна Печенина

ординатор,
Московский клинический научный
центр имени А. С. Логинова
(Россия, г. Москва, ул. Новогиреевская, 1 корп. 5)
E-mail: darya.pechenina2017@yandex.ru

Daria N. Pechenina

Resident,
Moscow Clinical Scientific Center
named after A.S. Loginov
(p. 5, 1 Novogireevskaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 04.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.11.2024

Принята к публикации/Accepted 02.12.2024

РАЗРАБОТКА ПЕРЧАТКИ-КОНТРОЛЛЕРА С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Д. Л. Овчинников¹, А. Ю. Тычков², А. К. Алимуратов³, А. В. Агейкин⁴

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

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ alansapfir@yandex.ru, ⁴ ageykinav@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современных контроллерах виртуальной реальности система обратной связи остается недостаточно развитой и, как правило, ограничивается лишь вибрационными откликами. Эта проблема препятствует пользователю полностью погрузиться в виртуальные сцены, так как не обеспечивает адекватного понимания взаимодействия между человеком и объектами в виртуальном мире. *Материалы и методы.* Проведен анализ существующих решений для реализации системы биологической обратной связи в виртуальной реальности. На основе выявленных преимуществ и недостатков был выбран пневматический привод с электронным управлением. Определены необходимые датчики и исполнительные механизмы для корректной работы системы. Рассмотрены различные типы датчиков, а также их достоинства и недостатки. *Результаты.* В результате проведенного анализа были выбраны ключевые компоненты для реализации системы: воздушный компрессор, пневматические двухпозиционные клапаны и подобраны варианты их исполнения. Определен подходящий микроконтроллер с возможностями расширения функционала за счет встроенных модулей, а также выбран тип датчика для определения положения пальцев. *Выводы.* Предложенное техническое решение может найти широкое применение не только в игровой индустрии, но и в реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций рук из-за травм, инсульта, заболеваний или старения.

Ключевые слова: виртуальная реальность, персональный компьютер, биологическая обратная связь, пневматика, микроконтроллер

Для цитирования: Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Агейкин А. В. Разработка перчатки-контроллера с биологической обратной связью виртуальной реальности на основе электропневматического привода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 90–96. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-11

DEVELOPMENT OF A GLOVE CONTROLLER WITH BIOFEEDBACK OF VIRTUAL REALITY BASED ON AN ELECTROPNEUMATIC DRIVE

D.L. Ovchinnikov¹, A.Yu. Tychkov², A.K. Alimuradov³, A.V. Ageikin⁴

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

¹ dmitry_ovch@mail.ru, ² tychkov-a@mail.ru, ³ alansapfir@yandex.ru, ⁴ ageykinav@yandex.ru

Abstract. *Background.* In modern virtual reality controllers, the feedback system remains underdeveloped and, as a rule, is limited only to vibration responses. This problem prevents the user from fully immersing himself in virtual scenes, as it does not provide an adequate understanding of the interaction between a person and objects in the virtual world. *Materials and methods.* The analysis of existing solutions for the implementation of a biofeedback system in virtual reality is carried out. Based on the identified advantages and disadvantages, an electronically controlled pneumatic actuator was selected. The necessary sensors and actuators have been identified for the correct operation of the system. Various types of sensors are considered, as well as their advantages and disadvantages. *Results.* As a result of the analysis, the key components for the implementation of the system were selected: an air compressor, pneumatic two-position valves and their variants were selected. A suitable microcontroller with the ability to expand functionality through built-in modules has been identified, and the type of sensor for determining the position of fingers has been selected. *Conclusions.* The proposed technical solution can find wide application not only in the gaming industry, but also in the rehabilitation of patients with impaired motor functions of the hands due to injuries, strokes, diseases or aging.

Keywords: virtual reality, personal computer, biofeedback, pneumatics, microcontroller

For citation: Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Ageikin A.V. Development of a glove controller with biofeedback of virtual reality based on an electropneumatic drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):90–96. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-11

Введение

В современном мире технологии виртуальной реальности (VR) продолжают стремительно развиваться, открывая новые горизонты для исследований и разработок. Одним из ключевых аспектов, способствующих повышению эффективности и реалистичности VR-систем, является использование биологической обратной связи (БОС) [1] в контроллерах. БОС позволяет интегрировать физиологические данные пользователя в виртуальный мир, создавая более интуитивное и естественное взаимодействие с окружающей средой.

На сегодня большинство существующих контроллеров [2] для виртуальной реальности не обладают системой обратной связи (ОС) соответствующего уровня. Чаще всего ОС ограничивается лишь функцией вибрационного отклика, например, при взаимодействии с объектами в сцене виртуальной реальности [3].

Внедрение функции биологической обратной связи в контроллеры позволит пользователям более полно погрузиться в виртуальный мир. Примером такого контроллера может служить перчатка, оснащенная специализированным механизмом, который создает нагрузку при сжатии и разгибании кисти, контролирует усилие для каждого пальца и отслеживает их положение.

Анализ предметной области

Современные устройства для взаимодействия с виртуальной реальностью обеспечивают достаточно точное отслеживание положения кисти в пространстве [2, 4, 5]. Однако положение пальцев часто ограничивается двумя состояниями, которые соответствуют нажатию или отпусканью определенных кнопок на контроллере. Хотя многие контроллеры оснащены так называемыми «курками» – поворачиваемыми переключателями, работающими относительно одной оси, большинство из них не имеют системы ОС, такой как сопротивление при нажатии. Исключением является контроллер Sony DualSense [6], в котором реализована подобная система.

Существуют также прототипы контроллеров-перчаток с биологической обратной связью, такие как HaptX, SensGlove, Phantom [7] и др. (рис. 1). Основной проблемой известных устройств является их ограниченная распространенность: зачастую такие системы разрабатываются в единственном экземпляре или небольших сериях и имеют высокую стоимость конечного продукта.



Рис. 1. Примеры контроллеров-перчаток для виртуальной реальности

Анализ известных технических решений контроллеров-перчаток для VR показал, что выделяются три основных вида системы реализации БОС [7]:

- электромеханический привод механизма создания усилия на сгибание и разгибание;
- пневматический привод с электронным управлением посредством микроконтроллера или компьютера;
- электростимуляцией нервов.

Все три технических исполнения имеют свои достоинства и недостатки. Электромеханический привод наиболее прост в реализации, однако имеет существенный недостаток в виде больших размеров и веса устройства. Для достижения необходимого усилия электродвигатель должен развивать соответствующий крутящий момент. Однако с уменьшением размеров

мотора его способность генерировать усилие на валу при определенном диапазоне оборотов снижается. Одним из решений этой проблемы является использование специально разработанного редуктора, основанного на системе блоков или зубчатых передач. Это позволяет минимизировать преимущества, получаемые от уменьшения геометрических размеров двигателя, и, как следствие, увеличивает общую массу конструкции. Большой вес устройства негативно сказывается на использовании, приводя к более быстрому возникновению усталости в конечностях. Кроме того, такой вариант реализации системы ОС требует значительных затрат энергии для приведения в движение электромоторов. Так, в разработанном прототипе контроллера-перчатки [3] средний ток потребления составлял 1,5–1,6 А, с частым пиковым током в 2 А при напряжении питания 5 В. Это способствует резкому уменьшению автономности системы.

Контроллер-перчатка с БОС, реализованной с помощью электростимуляции нервов, имеет значительно меньшие размеры по сравнению с предыдущим техническим решением. Однако у данного устройства имеются свои недостатки. Одним из основных является наличие медицинских противопоказаний: некоторые пользователи могут не иметь возможности использовать эту систему из-за непереносимости электрической стимуляции, что может привести к серьезным последствиям для здоровья.

Кроме того, существует проблема доставки электрических импульсов к нервам. Разное состояние кожи у различных людей (сухая, грубая, нежная и т.д.) приводит к изменению электрического сопротивления, что может препятствовать прохождению сигнала до нужного нерва при использовании сухих электродов. Одним из способов решения этой проблемы является применение специализированных электродов и проводящего геля. Однако полностью исключить влияние состояния кожного покрова у разных пользователей не представляется возможным. Также необходимо индивидуально подстраивать величину импульсов под каждого человека, так как слишком сильный электрический импульс может вызвать дискомфорт.

С другой стороны, реализация БОС с помощью пневматического привода с электронным управлением имеет ряд преимуществ. К ним относятся простота конструкции, создающей усилие на сжатие и разгибание, небольшой вес, который не нагружает конечность, а также легкость подстройки под индивидуальные параметры пользователя путем изменения давления в системе.

Однако существенным недостатком является необходимость поддержания рабочего давления в воздушном компрессоре и промежуточном баке. Тем не менее общая энергоэффективность данной системы значительно выше, чем у электромеханических аналогов. При рабочем давлении в системе, составляющем 1,5 бара, ток потребления при включенном компрессоре и электромагнитном клапане составил 1 А при напряжении питания 5 В в пиковом состоянии и 700–800 мА в состоянии покоя. Рассмотрим этот вариант исполнения устройства более подробно.

Предлагаемое решение

Для реализации предлагаемой системы контроллера-перчатки с БОС используются следующие основные узлы:

- воздушный компрессор;
- промежуточный бак хранения;
- пневматические клапаны с электронным управлением;
- ручные клапаны для возможного отключения привода на определенных пальцах;
- блок электроники для управления, реализованный на микроконтроллере;
- датчик положения кисти в пространстве (IMU сенсор);
- датчики положения пальцев – согнут или разогнут и насколько.

Рассмотрим данные узлы подробнее. В качестве воздушного компрессора можно использовать мини-помпы с напряжением питания 5 В. Они способны создавать давление в системе до 1,5 бар, при этом имея малые размеры, вес и возможность использовать в качестве источника питания стандартный powerbank для телефонов. Выход с насоса подключается к промежуточному баку. В резервуар устанавливается датчик давления для возможности отключения компрессора в целях экономии энергии, а также регулятор давления на выходе для возможности подстройки устройства под разных пользователей.

За счет использования реле давления и как следствие непостоянной работы компрессора общее электропотребление системы можно довести до одной-двух сотен миллиампер при включенных электромагнитных клапанах. В зависимости от варианта реализации пневматических

цилиндров на каждый палец необходим один клапан двойного действия – обратное движение осуществляется за счет пружины, а выброс воздуха осуществляется клапаном в атмосферу, либо два клапана при реализации обратного движения с помощью подачи давления с другой стороны цилиндра. Управление ими будет происходить с помощью микроконтроллера через силовые элементы – MOSFET-транзисторы.

Блок электроники возможно реализовать на нескольких микроконтроллерах – Atmega 328p, ESP8266, ESP32, STM32 [8, 9]. Наиболее выгодным является ESP32 за счет встроенного модуля Bluetooth и Wi-Fi, что позволит связать систему с персональным компьютером и с запущенной на нем сценой виртуальной реальности. Это повышает мобильность пользователя, использующего данное устройство, за счет отказа от проводного соединения [10].

Для отслеживания положения кисти в пространстве необходимо использовать IMU-сенсор – комбинированный датчик, включающий в себя гироскоп, акселерометр и магнитометр. Все это позволяет увеличить точность получаемых показателей. Для определения положения пальцев возможно использовать один из трех типов датчиков:

- резистивный (рис. 2,а);
- оптический (рис. 2,б);
- тензорезистивный (рис. 2,в).

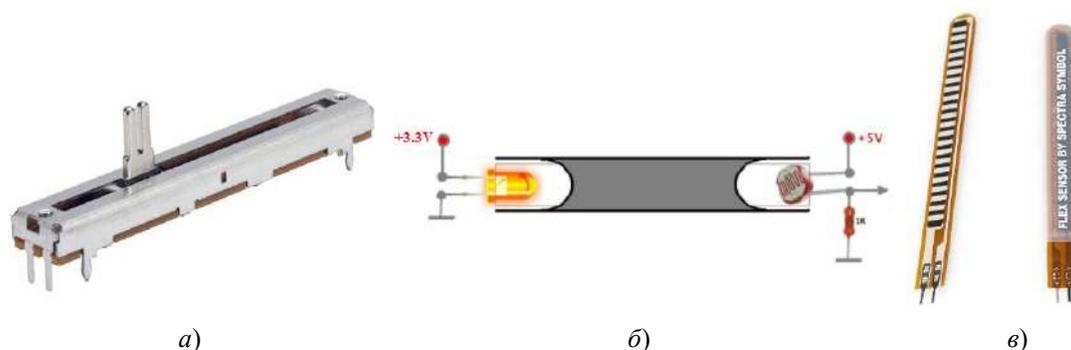


Рис. 2. Различные типы датчиков изгиба:
а – резистивный; б – оптический; в – тензорезистивный

В случае с резистивным датчиком [3, 11] используется переменный резистор линейного типа, соединенный с пальцем с помощью лески или нитки, а также пружина для возврата в нулевое положение. При сгибании или разгибании пальца ползунок перемещается, что приводит к изменению общего сопротивления в цепи «датчик – микроконтроллер». Эти изменения фиксируются в аналогово-цифровом преобразователе и используются для расчета необходимости открытия или закрытия электроклапана. Недостатком данного технического решения являются его размеры и относительно сложная конструкция, требующая дополнительных компонентов.

Оптический датчик [12] основан на фоторезисторе и постоянном источнике света, размещенных в противоположных концах гибкого светопроводящего стержня. При изменении формы пальца интенсивность излучения от источника света на фотосенсоре будет варьироваться, что позволяет определить степень сгибания или разгибания. Преимуществами данного решения являются компактные размеры и простота реализации. Однако со временем из-за постоянной деформации датчик может потерять чувствительность, вплоть до полной невозможности его дальнейшего использования. Кроме того, потребуется периодическая настройка конечных значений.

Тензорезистивный датчик отличается еще меньшими геометрическими размерами и простой схемой подключения [13]. Как и оптический датчик, он благодаря своей гибкости позволяет уменьшить общие габариты изделия и его вес. Однако, как и предыдущие варианты, он подвержен износу в процессе эксплуатации. Несмотря на свои недостатки, тензорезистивный датчик является наиболее выгодным в использовании благодаря своей простой конструкции [14].

Заключение

Таким образом, для создания эффективной системы БОС контроллера-перчатки с пневматическим приводом необходимы следующие ключевые компоненты: воздушный компрессор,

промежуточный бак, пневматические и ручные клапаны, блок электроники на основе микроконтроллера ESP32, инерциальный измерительный блок (IMU) и тензорезистивные датчики для определения положения пальцев. Данные элементы играют важную роль в обеспечении точного и надежного управления системой.

Использование воздушного компрессора с напряжением питания в 5 В позволяет подключать систему к повербанку. Применение реле давления для отключения электромотора минимизирует энергопотребление и обеспечивает высокую мобильность устройства. Микроконтроллер ESP32 с встроенными модулями Bluetooth и Wi-Fi повышает удобство использования и расширяет возможности взаимодействия с персональным компьютером и виртуальной реальностью.

Комбинированное использование всех этих компонентов позволяет создать эффективную и точную систему БОС, способную адаптироваться к различным потребностям и условиям эксплуатации. Предложенное техническое решение может найти широкое применение не только в игровой индустрии, но и в реабилитации пациентов с нарушениями моторных функций рук из-за травм, инсульта, заболеваний или старения.

Список литературы

1. Истомина Б. А., Истомин Т. В. Описание биологической обратной связи с использованием элементов теории автоматического управления // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 5 (27). С. 234–240.
2. Pat. WO/2020/013039 Japan. Information processing device and control method of controller device / Bailey T., Yamada E. № PCT/JP2019/026348 ; intenat. filling date 02.07.2019 ; publ. 16.01.2020. 66 p.
3. Новиков А. А. Новая VR-перчатка работает напрямую с нервной системой, минуя кожу. URL: <https://4pda.to/2024/02/04/423710> (дата обращения: 28.10.2024).
4. Либер Ю. С., Гюльмалиева С. Э., Тараканова Д. Ю. Тензометрические датчики. Виды и принципы работы // Коррекционно-педагогическое образование. 2021. № 5. С. 153–164.
5. Тычков А. Ю., Волкова К. Ю., Киселева Д. В., Родионова Е. А. Обзор систем виртуальной реальности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 2. С. 3–13.
6. Liu X., Zhang J., Hou G., Wang Z. Virtual Reality and Its Application in Military // Conference Series Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 3. P. 32–41.
7. Документация на микроконтроллер ESP32. Espressif Systems, 2024. 77 с.
8. Ермаков Д. А., Петрунина Е. В., Пшеничный А. Е. Биотехническая система реабилитации двигательной активности конечностей с биологической обратной связью посредством модуля виртуальной реальности // Биотехнология и биомедицинская инженерия : сб. науч. тр. по материалам XIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 88-летию Курского государственного медицинского университета. Курск, 2023. С. 113–116.
9. Овчинников Д. Л., Тычков А. Ю., Симакова О. С. [и др.]. Разработка контроллера-перчатки для реабилитации моторики верхних конечностей с использованием виртуальной реальности // Биомедицинская радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 34–40.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666983. Программа для идентификации рук и захвата предметов в среде виртуальной реальности / Чернышов Д. С., Тычков А. Ю., Золотарев Р. В., Сотников А. М., Маркелов С. О., Овчинников Д. Л. № 2022666033 ; заявл. 29.08.2022 ; опубл. 13.09.2022. 10 с.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022668843. Программа для идентификации аватара в среде виртуальной реальности / Чернышов Д. С., Тычков А. Ю., Золотарев Р. В., Сотников А. М., Маркелов С. О., Овчинников Д. Л. № 2022668224 ; заявл. 03.10.2022 ; опубл. 12.10.2022. 11 с.
12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022661915. Программа контролируемого нагрева тепла для микроконтроллера Atmega328P / Тычков А. Ю., Овчинников Д. Л., Сашина А. Д., Чернышов Д. С., Майданов Н. А., Лебедев И. А. № 2022660489 ; заявл. 08.06.2022 ; опубл. 28.06.2022.
13. Васин С. В., Иванов О. В. Разработка схемы управления и опроса волоконно-оптического датчика изгиба на основе волокна с двойной оболочкой // Автоматизация процессов управления. 2017. № 1. С. 101–107.
14. Пат. RU2079808C1 Российская Федерация МПК G 01 B 7/00. Резистивный датчик положения / Федосов А. А. № 5022105/28 ; заявл. 13.01.1992 ; опубл. 20.05.1997.

References

1. Istomin B.A., Istomina T.V. Description of biofeedback using elements of the theory of automatic control. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2015;(5):234–240. (In Russ.)

2. Patent WO/2020/013039 Japan. *Information processing device and control method of controller device*. Bailey T., Yamada E. № PCT/JP2019/026348; intenat. filling date 02.07.2019; publ. 16.01.2020. 66 p.
3. Novikov A.A. *Novaya VR-perchatka rabotaet napryamuyu s nervnoy sistemoy, minuya kozhu = The new VR glove works directly with the nervous system, bypassing the skin*. (In Russ.). Available at: <https://4pda.to/2024/02/04/423710> (accessed 28.10.2024).
4. Liber Yu.S., Gyul'malieva S.E., Tarakanova D.Yu. Strain gauges. Types and principles of work. *Korreksionno-pedagogicheskoe obrazovanie = Correctional and pedagogical education*. 2021;(5): 153–164. (In Russ.)
5. Tychkov A.Yu., Volkova K.Yu., Kiseleva D.V., Rodionova E.A. Review of virtual reality systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2020;(2):3–13. (In Russ.)
6. Liu X., Zhang J., Hou G., Wang Z. Virtual Reality and Its Application in Military. *Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018;3:32–41.
7. *Dokumentatsiya na mikrokontroller ESP32*. Espressif Systems, 2024:77.
8. Ermakov D.A., Petrunina E.V., Pshenichnyy A.E. A biotechnical system for rehabilitation of limb motor activity with biofeedback through a virtual reality module. *Biotehnologiya i biomeditsinskaya inzheneriya: sb. nauch. tr. po materialam KhIII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 88-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Biotechnology and biomedical engineering : collection of scientific papers based on the materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international conferences. participation, dedication. 88th anniversary of Kursk State Medical University*. Kursk, 2023:113–116. (In Russ.)
9. Ovchinnikov D.L., Tychkov A.Yu., Simakova O.S. et al. Development of a glove controller for upper limb motor rehabilitation using virtual reality. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radio electronics*. 2024;27(5):34–40. (In Russ.)
10. Registration certificate for EVM RU 2022666983. *Programma dlya identifikatsii ruk i zakhvata predmetov v srede virtual'noy real'nosti = A program for identifying hands and grabbing objects in a virtual reality environment*. Chernyshov D.S., Tychkov A.Yu., Zolotarev R.V., Sotnikov A.M., Markelov S.O., Ovchinnikov D.L. № 2022666033; appl. 29.08.2022; publ. 13.09.2022. 10 p. (In Russ.)
11. Registration certificate for EVM RU 2022668843. *Programma dlya identifikatsii avatara v srede virtual'noy real'nosti = A program for identifying an avatar in a virtual reality environment*. Chernyshov D.S., Tychkov A.Yu., Zolotarev R.V., Sotnikov A.M., Markelov S.O., Ovchinnikov D.L. № 2022668224; appl. 03.10.2022; publ. 12.10.2022. 11 p. (In Russ.)
12. Registration certificate for EVM RU 2022661915. *Programma kontroliruemogo nagreva tepla dlya mikrokontrollera Atmega328P = Controlled heat heating program for the ATmega328P microcontroller*. Tychkov A.Yu., Ovchinnikov D.L., Sashina A.D., Chernyshov D.S., Maydanov N.A., Lebedev I.A. № 2022660489; appl. 08.06.2022; publ. 28.06.2022. (In Russ.)
13. Vasin S.V., Ivanov O.V. Development of a control scheme and polling of a fiber-optic bending sensor based on a fiber with a double shell. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2017;(1):101–107. (In Russ.)
14. Patent RU2079808C1 Russian Federation MPK G 01 B 7/00. *Rezistivnyy datchik polozheniya = Resistive position sensor*. Fedosov A.A. № 5022105/28; appl. 13.01.1992; publ. 20.05.1997. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Леонидович Овчинников

инженер кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitry_ovch@mail.ru

Dmitry L. Ovchinnikov

Engineer of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Aleksandr Yu. Tychkov

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of radio engineering
and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алан Казанферович Алимуратов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Викторович Агейкин

кандидат медицинских наук,
доцент кафедры микробиологии,
эпидемиологии и инфекционных болезней,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ageykinav@yandex.ru

Aleksey V. Ageikin

Candidate of medical sciences, associate professor
of the sub-department of microbiology,
epidemiology and infectious diseases,
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 20.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 15.12.2024

Принята к публикации/Accepted 12.01.2025