

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

№ 2, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Мишина К. Д., Новиков Д. В., Мартынов Д. В.
ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ЛОТКИ – ВОЛЬТЕРРА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

5

*Благодыренко Е. А., Куприянов Н. А., Логунов С. В.,
Шосталь В. Ю., Шуняков В. А.*
МЕТОД КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ
С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ТОЧНОСТИ
И ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ ПРОГНОЗА

14

Фролов К. В., Инаходова Л. М.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

25

Чуввыкин Б. В., Долгова И. А.
МЕТОД СИНТЕЗА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ
ЗАМКНУТОГО ВИДА С ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОЙ И ФИНИТНОЙ
ИМПУЛЬСНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИЕЙ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

32

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Морозов М. М., Трофимов А. А., Урваев И. Н., Целикин К. Д., Бодин О. Н.
ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНОГО ДАТЧИКА
В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НАВИГАЦИИ

40

Трофимов А. А., Здобнов С. А., Забродин С. О., Фокина Е. А.
ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СЕНСОРНЫХ И АКТЮАТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ
СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ
НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

51

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Якушов Д. В., Печерская Е. А.
ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ
НА ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ ОБРАТНОХОДОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

61

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Алимурадов А. К., Чернышов Д. С., Симакова О. С.,
Тычкова А. Н., Овчинников Д. А.*
ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ НА ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ
КАЧЕСТВА РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ

67

Ивахно Н. В., Зыкин С. И.
МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ В КОМПЛЕКСАХ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЫХАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ

73

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Bezborodova O.E., Bodin O.N., Mishina K.D., Novikov D.V., Martynov D.V.

ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF THE LOTKA – VOLTERRA MODEL
FOR DETERMINING HUMAN ECOLOGICAL WELL-BEING

5

Blagodyrenko E.A., Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Shostal V.Yu., Shunyakov V.A.

A METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MEASUREMENTS
OF THE MANEUVERING SATELLITES MOTION PARAMETERS
IN ORDER TO ACHIEVE THE BEST ACCURACY
AND RELIABILITY OF THEIR FORECAST

14

Frolov K.V., Inakhodova L.M.

EXPERIMENTAL STUDY OF INFORMATION PARAMETERS
OF ACOUSTIC NOISE

25

Chuvykin B.V., Dolgova I.A.

METHOD OF SYNTHESIS OF ANALOG-DIGITAL CLOSED-FORM
FILTERS WITH LINEAR PHASE AND FINISHED PULSE
WEIGHTING FUNCTION FOR MULTI-CHANNEL
INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

32

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Morozov M.M., Trofimov A.A., Urvaev I.N., Celikin K.D., Bodin O.N.

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF A HYBRID SENSOR
IN AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

40

Trofimov A.A., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Fokina E.A.

QUESTIONS OF DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY
AND MANUFACTURING OF SENSOR AND ACTUATOR
ELEMENTS OF THE SYSTEMS OF STRUCTURAL PERFORMANCE
MONITORING BASED ON PIEZOCERAMIC MATERIALS

51

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Yakushov D.V., Pecherskaya E.A.

INFLUENCE OF EQUIVALENT SERIES RESISTANCE
OF OUTPUT CAPACITORS ON THE TRANSFER
FUNCTION OF FLYBACK CONVERTER

61

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Alimuradov A.K., Chernyshov D.S., Simakova O.S.,

Tychkova A.N., Ovchinnikov D.L.

VIRTUAL REALITY TO IMPROVE THE QUALITY
OF PATIENT REHABILITATION

67

Ivakhno N.V., Zikin S.I.

METHODS AND TECHNICAL MEANS OF AUTOMATIC
CONTROL IN COMPLEXES OF CORRECTIVE EFFECTS
ON THE RESPIRATORY SYSTEM

73

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.518.3

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-1

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ЛОТКИ – ВОЛЬТЕРРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

О. Е. Безбородова¹, О. Н. Бодин², К. Д. Мишина³, Д. В. Новиков⁴, Д. В. Мартынов⁵

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

^{2, 5} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ oxana243@yandex.ru, ² bodin_o@inbox.ru, ^{3, 4, 5} ot@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Использование математики в сфере экологической безопасности имеет давние корни. Наиболее известной математической моделью в экологии является модель Лотки – Вольтерра, описывающая взаимоотношения между хищником и жертвой в естественной экосистеме. Авторами предложена усовершенствованная трехэлементная модель Лотки – Вольтерра, учитывающая взаимодействие трех элементов территориальной техносферы: человека, окружающей среды и объекта техносферы. Целью исследования является проверка адекватности усовершенствованной модели Лотки – Вольтерра процессу взаимодействия элементов в территориальной техносфере. Проверка адекватности модели формулируется как задача проверки предположения о том, что значение отклика модели отличается от реального отклика системы не более чем на заданную величину. Объектом исследования является усовершенствованная модель Лотки – Вольтерра, учитывающая взаимодействие человека, окружающей среды и объекта техносферы. *Материалы и методы.* Исследование проведено с использованием комплексного системного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения. *Результаты.* Из всех проанализированных критериев адекватности модели существует критерий согласия χ^2 Пирсона, критерий Смирнова – Колмогорова, критерий Фишера (Фишера – Снедекора), наиболее предпочтительным является критерий Фишера, так как подходит для сравнения очень малых выборок, бывает односторонним и двусторонним. *Выводы.* Усовершенствованная математическая модель Лотки – Вольтерра, описывающая взаимодействие элементов в территориальной техносфере, адекватно отображает состояние территориальной техносферы при прогнозировании и по абсолютным значениям факторов риска.

Ключевые слова: математическая модель, уравнение Лотки – Вольтерра, моделирование, прогнозирование, адекватность, F-критерий Фишера

Для цитирования: Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Мишина К. Д., Новиков Д. В., Мартынов Д. В. Оценка адекватности модели Лотки – Вольтерра для определения экологического благополучия человека // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 5–13. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-1

ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF THE LOTKA – VOLTERRA MODEL FOR DETERMINING HUMAN ECOLOGICAL WELL-BEING

O.E. Bezborodova¹, O.N. Bodin², K.D. Mishina³, D.V. Novikov⁴, D.V. Martynov⁵

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

^{2, 5} Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ oxana243@yandex.ru, ² bodin_o@inbox.ru, ^{3, 4, 5} ot@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The use of mathematics in the field of environmental safety has long roots. The most famous mathematical model in ecology is the Lotka – Volterra model, which describes the relationship between predator and

prey in a natural ecosystem. The authors proposed an improved three-element Lotka – Volterra model that takes into account the interaction of three elements of the territorial technosphere: a person, the environment, and an object of the technosphere. The aim of the study is to test the adequacy of the improved Lotka – Volterra model to the process of interaction of elements in the territorial technosphere. Model adequacy testing is formulated as the task of testing the assumption that the value of the model response differs from the real response of the system by no more than a given value. The object of the study is the improved Lotka – Volterra model, which takes into account the interaction of man, the environment and the object of the technosphere. *Materials and methods.* The study was carried out using an integrated systematic approach and methods of analysis and synthesis, grouping and generalization. *Results.* Of all the analyzed criteria for the adequacy of the model, there is Pearson's χ^2 goodness-of-fit test, Smirnov – Kolmogorov's test, Fisher's (Fischer – Snedecor's) test, Fisher's test is the most preferable, since it is suitable for comparing very small samples, it can be one-sided and two-sided. *Conclusions.* The improved Lotka – Volterra mathematical model describing the interaction of elements in the territorial technosphere adequately reflects the state of the territorial technosphere in forecasting and in terms of the absolute values of risk factors.

Keywords: mathematical model, Lotka – Volterra equation, modeling, forecasting, adequacy, Fisher F-criterion

For citation: Bezborodova O.E., Bodin O.N., Mishina K.D., Novikov D.V., Martynov D.V. Assessment of the adequacy of the Lotka – Volterra model for determining human ecological well-being. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):5–13. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-1

Постановка проблемы

Использование математики в сфере экологической безопасности имеет давние корни. Уже в пятидесятых годах двадцатого века основоположник современной экологии Ю. Одум в работе [1] доказал важность и необходимость применения математического моделирования в области экологии, охраны окружающей среды и использования природных ресурсов.

Математическое моделирование требовалось для получения данных о динамике изменения исследуемых природных объектов под воздействием объектов техносферы. Получение экспериментальных данных об этих объектах затруднено из-за растянутости во времени базовых процессов, их труднодоступности, опасности для персонала, проводящего исследование, в некоторых случаях вообще невозможности проведения натурных экспериментов, например, при исследовании воздействия химического загрязнения окружающей среды на здоровье человека.

Полученные в результате математического моделирования данные необходимы для прогнозирования изменения состояния территориальной техносферы и обоснованного принятия хозяйственных решений.

Наиболее известной математической моделью в экологии является модель Лотки – Вольтерра, описывающая взаимоотношения между хищником и жертвой в естественной экосистеме. Несмотря на ее первоначальную узкую направленность, с течением времени ее стали широко применять в различных областях науки [2].

Авторами предложена усовершенствованная трехэлементная модель Лотки – Вольтерра, учитывающая взаимодействие трех элементов территориальной техносферы: человека, окружающей среды и объекта техносферы [3, 4].

Предложенная модель использована для моделирования и прогнозирования изменения экологического благополучия человека в территориальной техносфере. Она позволяет комплексно оценить динамику процессов взаимодействия элементов в территориальной техносфере, понять, необходимо ли осуществлять корректирующие мероприятия (лечебно-профилактические, природоохранные, технологические). Для имитационного моделирования авторы использовали пакет *MatLab/Simulink*.

Качество любой математической модели оценивается величиной расхождений на участке аппроксимации (построения модели) между фактическими и расчетными значениями и определяется ее *адекватностью* исследуемому процессу и характеризуется наличием определенных статистических свойств.

Целью исследования является проверка адекватности усовершенствованной модели Лотки – Вольтерра процессу взаимодействия элементов в территориальной техносфере.

Проверка адекватности модели формулируется как **задача** проверки предположения о том, что значение отклика модели отличается от реального отклика системы не более чем на заданную величину.

Объектом исследования является усовершенствованная модель Лотки – Вольтерра, учитывающая взаимодействие человека, окружающей среды и объекта техносферы.

Исследование проведено с использованием комплексного системного подхода и методов анализа и синтеза, группировки и обобщения.

Материалы и методы

Перед началом использования разработанной математической модели необходимо убедиться в том, что она соответствует описываемому ею объекту, процессу или явлению, т.е. массив данных, полученных при исследовании модели, будет незначительно отличаться от данных, полученных при экспериментальном исследовании.

Исследование новой математической модели проводят сравнением данных, полученных на модели, с данными натурных экспериментов или данными, полученными на уже существующих математических моделях, хорошо зарекомендовавших себя в процессе исследования. Эти способы проверки математической модели называют проверкой экспериментом (первый вариант) и проверкой тестированием (второй вариант).

Адекватность математической модели характеризуется ее соответствием моделируемому объекту, процессу или явлению. Но в этом случае имеется в виду не абсолютное соответствие свойств модели и объекта, соответствие по выбранному свойству или совокупности свойств являющихся важным. Чаще всего таким свойством выбирают точность и задают для нее граничные значения. Под точностью понимают степень совпадения значений выходных параметров математической модели и моделируемого объекта.

Общеизвестно, что точность зависит от условий, в которых находится исследуемый объект, т.е. от условий внешней среды. В этой внешней среде, характеризуемой совокупностью параметров, необходимо выделить область, в которой математическая модель будет считаться адекватной и погрешность меньше заданной.

Нахождение этой области по одному или по совокупности параметров, с одной стороны, – сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. С другой стороны, разработано большое количество математических методов, позволяющих определить адекватность математических моделей.

При наличии достоверных данных (экспериментальных или расчетных) проверку адекватности новой математической модели можно провести, используя методы математической статистики [5]. Для достижения цели – оценки адекватности математической модели – необходимо определить, на какую величину отличаются данные, полученные с использованием новой математической модели W_m , от данных, полученных в ходе натурального эксперимента W . Чаще всего это значение ϵ^* задается для каждой модели. И задача оценки адекватности математической модели определяется следующим образом:

$$|W(x) - W_m| = |\epsilon| \leq \epsilon^*. \quad (1)$$

Но данные натурального эксперимента $\tilde{W}$ не предсказуемы из-за наличия большого количества факторов, действующих во внешней среде. Они могут изменяться из-за неконтролируемого дрейфа параметров исследуемого объекта, разброса характеристик его элементов, ошибок измерения и отличаться от W . Поэтому при сравнении результатов математического моделирования и натурального эксперимента будет получено множество значений $\{\epsilon_i\}$, зависящее от комплекса случайных величин

$$\tilde{W}_i(x) - W_m(x) = \epsilon_i, \quad (2)$$

где i – количество данных, изменяющееся от 1 до n , среди которых будут значения $\epsilon_i > \epsilon^*$, $\epsilon_i < \epsilon^*$ и $\epsilon_i = \epsilon^*$.

Для выяснения причин возникновения и значимости этих отклонений, используя множество значений $\{\epsilon_i\}$, рассчитывают статистические критерии для оценки адекватности математической модели.

При оценке адекватности математической модели рассматривают две взаимоисключающие гипотезы H_0 и H_1 . Гипотеза H_0 – это утверждение, что математическая модель адекватна исследуемому объекту при заданных условиях. Гипотеза H_1 , соответственно, является альтернативной.

Исходя из того, что множество $\{\epsilon_i\}$ случайно, подтверждение истинности каждой из гипотез имеет вероятностный характер. И при анализе результатов можно допустить ошибку и выбрать неправильную модель или отказаться от истинной. Вероятность ошибочного отказа от

истинной модели обозначают a , вероятность ошибочного принятия неправильной модели – b . Эти вероятности имеют обратную зависимость, но в любом случае их необходимо минимизировать. При проверке адекватности модели параметр a выбирают из множества значений $a = \{0,05; 0,01; 0,005; 0,001\}$ и при этом во всех случаях правильная математическая модель отвергается.

Параметр $1-b$ показывает вероятность неиспользования неадекватной математической модели и его называют мощностью критерия адекватности, так как он является мерой его эффективности.

Для оценки адекватности модели взаимодействия элементов территориальной сферы могут быть использованы хорошо известные и зарекомендовавшие себя математические способы.

К ним относят критерии Пирсона (χ^2), Смирнова – Колмогорова (λ), Фишера (Фишера – Снедекора) (F) [5].

Каждый из этих критериев имеет свою область применения и именно в ней дает хорошие результаты.

По критерию χ^2 Пирсона адекватность математической модели исследуемой системе определяют с заданной вероятностью p , т.е. при n экспериментах $np = n_1$ значений параметра ε_i будет удовлетворять выражению (1), т.е. показано, что математическая модель адекватна системе. И наоборот, только $(1-p)n = n_2$ значений проиллюстрируют неадекватность исследуемой математической модели. Все результаты эксперимента будут разделены на две группы: подтверждающий адекватность математической модели с частотой n_1 и не подтверждающие – с частотой n_2 . И эти частоты будут связаны выражениями

$$\begin{aligned} n_1 &\gg pn, \\ n_2 &\gg (1-p)n, \\ n_1 + n_2 &= n. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения n_1 и n_2 могут не соответствовать точным значениям вероятностных оценок в двух случаях:

- математическая модель не адекватна системе, т.е. вероятность p задана не верно;
- наличие случайных отклонений.

Для исключения второго варианта, выяснения случайности отклонения n_1 и n_2 от соответствующих вероятностей, рассчитывают параметр

$$U^* = \frac{(v_1 - pn)^2}{pn} + \frac{[v_2 - (1-p)n]^2}{(1-p)n}. \quad (4)$$

Эта функция является суммой квадратов отклонений, отнесенных к соответствующим вероятностям.

Рассчитанное по формуле (4) значение сравнивают с табличными критическими значениями критерия Пирсона для заданного уровня риска α .

Если рассчитанное значение превышает табличное, то делают вывод о неадекватности математической модели, т.е. верна гипотеза H_1 .

Если рассчитанное значение не превышает табличное, то делают вывод о том, что отклонения случайны и математическая модель адекватна, т.е. верна гипотеза H_0 .

Заключение о неадекватности модели не всегда требует отказа от ее использования. Можно изменить исходные данные для проверки адекватности и провести проверку еще раз. К варьируемым в этом случае данным относят интервал изменения определяемого параметра $\pm \varepsilon^*$ и доверительную вероятность p . Интервал увеличивают, а вероятность уменьшают. В этом случае уменьшаются частоты n_1 и n_2 и расчет по формуле (4), с последующим сравнением с табличными значениями покажет адекватность математической модели. Но в таком случае нужно помнить, что точность модели будет меньше, чем задано изначально.

Кроме этого, можно уменьшить задаваемую в исходных данных для моделирования величину вероятности ошибочного отказа от истинной модели. Как следствие, увеличится критерий $c_{1,a}^2$ Пирсона, а также то, что будет признано адекватной исследуемой математической моделью.

Также можно увеличить объем анализируемых данных, если это возможно. В наличие имеются большие массивы экспериментальных и теоретических данных, но это не всегда возможно из-за ограниченности информации об исследуемых объектах, процессах, явлениях.

Если в результате анализа адекватности по критерию c^2 Пирсона будет получено, что $U > c_{1,a}^2$, то отсюда следует, что доверительный интервал слишком велик и его необходимо уменьшить, либо занижена доверительная вероятность p и ее необходимо увеличить. Исходя из этого, можно сделать вывод, что математическая модель оказалась точнее, чем предполагали.

Недостатком критерия c^2 Пирсона является относительно большой объем данных для анализа. Необходимо иметь как минимум 20 значений.

Критерий Смирнова – Колмогорова (критерий согласия или λ -критерий) предназначен для сопоставления двух выборок значений с целью нахождения точки, в которой расхождение между ними является наибольшим, и оценки достоверности этого расхождения. Сопоставление может быть проведено как между двумя экспериментальными выборками, так и между экспериментальной и теоретически составленной выборками.

λ -критерий основан на нахождении максимального значения отклонения между двумя сопоставляемыми выборками

$$S - \sup\{\varepsilon_i\} = \sup\{\tilde{W}_i - W_{mi}\}. \quad (5)$$

Для каждой пары выборок строится вспомогательная функция, вычисляемая как отношение максимальной разности (без учета знака) между значениями накопленных частот двух выборок ($d_{\max}$) к корню квадратному из численности выборки (n):

$$\lambda_n^* = \frac{d_{\max}}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

Результат расчета по формуле (6) сравнивается с табличным значением $\lambda_{n,a}$ λ -функции Смирнова – Колмогорова.

Если рассчитанное значение λ -функции Смирнова – Колмогорова больше заданного в таблице – математическая модель признается неадекватной.

Если рассчитанное значение λ -функции Смирнова – Колмогорова меньше или равно табличному значению, то математическая модель признается адекватной.

Этот критерий используют при недостаточном количестве данных об исследуемом объекте (меньше 20 значений).

Недостатком критерия Смирнова – Колмогорова является требование упорядоченности значений сопоставляемых выборок, т.е. каждая из них должна быть сформирована либо по нарастанию, либо по убыванию анализируемого параметра, но в любом случае это однонаправленное его изменение.

Для использования F -критерия Фишера должны быть выполнены условия, заключающиеся в том, что сопоставляемые значения:

- должны быть представлены в номинальной шкале;
- иметь только два значения.

Неоспоримым достоинством F -критерия Фишера является его применимость к малым выборкам, когда весь массив анализируемых данных $n \leq 10$ значений. Такой объем выборки не позволяет использовать критерий c^2 Пирсона.

Точный критерий Фишера бывает односторонним и двусторонним. При одностороннем варианте точно известно, куда отклонится один из показателей. Двусторонний тест является предпочтительным, так как оценивает различия частот по двум направлениям: оценивается вероятность как большей, так и меньшей частоты явления.

Оценка адекватности на основе **критерия Фишера** осуществляется путем анализа дисперсий по формуле

$$F = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2}, \quad (7)$$

где $S_{\text{факт}}^2$ – факторная дисперсия, определяемая по формуле

$$S_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum (\hat{y}_x - \bar{y})^2}{m}, \quad (8)$$

$S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия, определяемая по формуле

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - m - 1}, \quad (9)$$

где y – измеренное значение анализируемого параметра; $\bar{y}$ – среднее арифметическое значение измеряемого параметра; n – число наблюдений; m – число параметров при переменной x ; x – количество факторов в модели регрессии.

В зависимости от типа исследуемой модели регрессии применяемая формула определения F -критерия Фишера может меняться. Для расчета F -критерия Фишера для парной линейной регрессии формула (7) примет вид

$$F = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{\sum (\hat{y}_x - \bar{y})^2}{\sum (y - \hat{y}_x)^2} (n - 2). \quad (10)$$

При использовании коэффициента детерминации расчет F -критерия Фишера для парной линейной регрессии *по коэффициенту детерминации* формула (7) примет вид

$$F = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} (n - 2), \quad (11)$$

где r_{xy}^2 – коэффициент детерминации.

Для парной нелинейной регрессии расчет F -критерия Фишера проводят по *индексу детерминации* и тогда формула (7) примет вид

$$F = \frac{\rho_{xy}^2}{1 - \rho_{xy}^2} \frac{n - m - 1}{m}, \quad (12)$$

где ρ_{xy}^2 – индекс детерминации.

Для уравнений множественной регрессии F -критерия Фишера рассчитывают по формуле

$$F = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{k_{\text{кор}}^2}{1 - k_{\text{кор}}^2} \frac{n - m - 1}{m}, \quad (13)$$

где $k_{\text{кор}}^2$ – коэффициент корреляции.

В процессе исследования уравнения множественной регрессии кроме общего F -критерия Фишера могут быть рассчитаны частные F -критерии. В случае анализа уравнения с двумя регрессорами (переменными) вычисление частных F -критериев Фишера может быть выполнено по формулам

$$F_{x_1} = \frac{R_{yx_1x_2}^2 - r_{yx_2}^2}{1 - R_{yx_1x_2}^2} (n - 3), \quad F_{x_2} = \frac{R_{yx_1x_2}^2 - r_{yx_1}^2}{1 - R_{yx_1x_2}^2} (n - 3). \quad (14)$$

Для определения статистической значимости рассчитанного значения F -критерия Фишера его сравнивают с критическими или табличными значениями. При этом табличные значения определяются на основе числа наблюдений, степеней свободы и заданного уровня значимости как $F_{\text{табл}}(a, k_1, k_2)$, где $k_1 = m$ – количество факторов в построенной регрессионной модели, $k_2 = n - m - 1$, где n – число наблюдений.

Интерпретация F -критерия Фишера осуществляется следующим образом. Если рассчитанная величина F_{x_i} превышает критическое или табличное значение, то дополнительное включение фактора x_i в регрессионную модель статистически оправдано и коэффициент регрессии b_i при соответствующем факторе x_i статистически значим.

Если рассчитанная величина F_{x_i} меньше критического или табличного значения, то дополнительное включение фактора x_i в регрессионную модель статистически не оправдано, так как данные фактор и коэффициент регрессии b_i при нем являются статистически незначимыми.

Результаты исследования

Оценка точности прогнозирования состояния территориальной техносферы при оценке экологического благополучия человека проведена в работе [6]. Результаты этих исследований используем для оценки адекватности усовершенствованной модели Лотки – Вольтерра.

Учитывая, что и территориальная техносфера и каждый из ее элементов являются многопараметрическими объектами, для проверки адекватности модели территориальной техносферы на основе системы дифференциальных уравнений Лотки – Вольтерра используем формулу F -критерия Фишера для множественной нелинейной регрессии и проведем расчет F -критерия Фишера по коэффициенту детерминации.

Исходя из этого, получаем значения F -критерия Фишера, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	$k^2_{\text{дет}}$	m	Рассчитанные значения F -критерия Фишера при различных количествах наблюдений, n										
			10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Абсолютные значения факторов риска	0,6331	3	3,45	4,03	4,6	5,18	5,75	6,33	6,9	7,48	8,05	8,63	9,2
Значения риска	0,6333	3	3,45	4,03	4,6	5,18	5,76	6,33	6,91	7,48	8,06	8,64	9,21
Табличные значения F -критерия Фишера			4,76	4,35	4,07	3,86	3,71	3,59	3,49	3,41	3,34	3,29	3,24
Заключение об адекватности модели			–	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+

На рис. 1 приведены зависимости значений F -критерия Фишера от количества наблюдений.

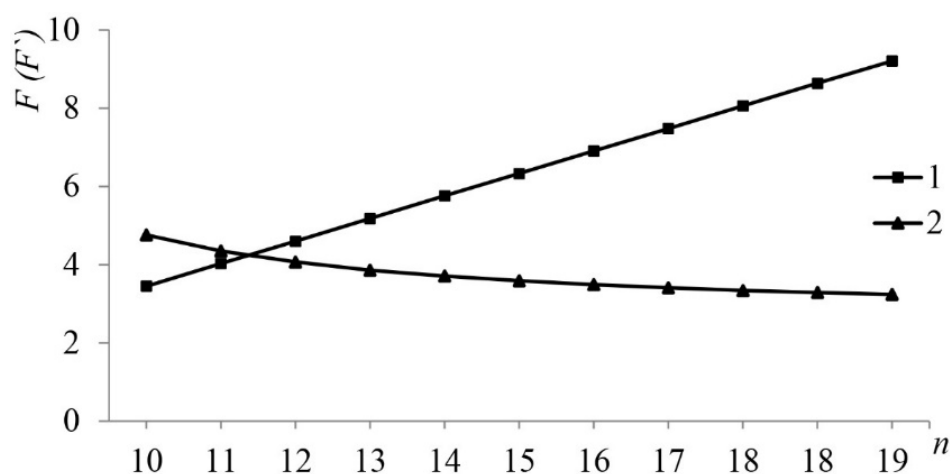


Рис. 1. Динамика адекватности математической модели территориальной техносферы:
1 – зависимость рассчитанных значений F -критерия Фишера (F) от количества наблюдений (n);
2 – зависимость табличных значений F -критерия Фишера (F') от количества наблюдений (n)

Анализ полученных критериев оценки адекватности усовершенствованной модели Лотки – Вольтерра показывает, что:

- модель адекватна и 95,5 % вариаций абсолютных значений факторов риска и значений риска объясняется вариацией их предшествующих значений;
- модель адекватна начиная с 12 измерений;
- табличное значение F -критерия Фишера при уровне значимости 0,05 составляет 4,07.

Заключение

Таким образом, усовершенствованная математическая модель Лотки – Вольтерра, описывающая взаимодействие элементов в территориальной техносфере, адекватно отображает состояние территориальной техносферы при прогнозировании и по абсолютным значениям факторов риска, и по значениям риска имея не менее 12 наблюдений.

Список литературы

1. Одум Ю. Основы экологии : пер. с 3-го англ. изд. / под ред. и с предисл. д-ра биол. наук Н. П. Наумова. М. : Мир, 1975. 740 с.
2. Титов В. А., Вейнберг Р. Р. Анализ существующих динамических моделей на базе системы уравнений Лотки – Вольтерры «хищник-жертва» // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 8-2. С. 409–413.
3. Bezborodova O., Bodin O., Martynov D. Forecasting the state of the environment based on the assessment of technogenic risk // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2700. P. 050002. doi: 10.1063/5.0127012
4. Безбородова О. Е. Имитационное моделирование взаимодействия человека и объекта техносферы в информационно-измерительных и управляющих системах обеспечения экологического благополучия человека // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2023. № 1. С. 164–177. doi: 10.21685/2227-8486-2023-1-11
5. Введение в математическое моделирование : учеб. пособие / под ред. П. В. Трусова. М. : Логос, 2004. 440 с.
6. Безбородова О. Е. Оценка точности прогнозирования состояния территориальной техносферы в информационно-измерительной и управляющей системе обеспечения экологического благополучия человека // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 4. С. 43–50. doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-6

References

1. Odum Yu. *Osnovy ekologii: per. s 3-go angl. izd. = Fundamentals of ecology : trans. from the 3rd English edition*. Moscow: Mir, 1975:740. (In Russ.)
2. Titov V.A., Veynberg R.R. Analysis of existing dynamic models based on the Lotka–Volterra system of equations "predator-prey". *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2016;(8-2):409–413. (In Russ.)
3. Bezborodova O., Bodin O., Martynov D. Forecasting the state of the environment based on the assessment of technogenic risk. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2700:050002. doi: 10.1063/5.0127012
4. Bezborodova O.E. Simulation modeling of interaction between a person and an object of the technosphere in information-measuring and control systems for ensuring human environmental well-being. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, and networks in economics, technology, nature, and society*. 2023;(1):164–177. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-1-11
5. Trusov P.V. (ed.). *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie: ucheb. posobie = Introduction to mathematical modeling : textbook*. Moscow: Logos, 2004:440. (In Russ.)
6. Bezborodova O.E. Assessment of the accuracy of forecasting the state of the territorial technosphere in the information-measuring and control system for ensuring human environmental well-being. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(4):43–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2022-4-6

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oxana243@yandex.ru

Oksana E. Bezborodova

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of technosphere safety,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
профессор кафедры технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of information-measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
professor of the sub-department
of technical quality management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

Кристина Дмитриевна Мишина

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

Kristina D. Mishina

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

Дмитрий Владимирович Новиков

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

Dmitry V. Novikov

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

Дмитрий Владиславович Мартынов

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Dmitry V. Martynov

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 27.02.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.03.2024

Принята к публикации/Accepted 15.04.2024

МЕТОД КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАВНОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ С ЦЕЛЬЮ ДОСТИЖЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ ПРОГНОЗА

Е. А. Благодыренко¹, Н. А. Куприянов², С. В. Логунов³,
В. Ю. Шосталь⁴, В. А. Шуняков⁵

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

² Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова,
Краснодар-5, Краснодарский край, Россия

⁴ Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Войсковая часть 17204, Коломна-1, Московская обл., Россия

¹ blagodyrenroev@mail.ru, ² sektor-ussr@rambler.ru, ³ skobarik83@rambler.ru,

⁴ shostal@mail.ru, ⁵ vase-lek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рост числа космических объектов техногенного происхождения в космосе, уменьшение их размера, выведение на околоземные орбиты многоспутниковых космических систем и все более широкое использование маневрирующих спутников негативно влияют на осуществление космической деятельности вследствие возрастания вероятности столкновений в космосе. Следовательно, актуальной научной задачей является исследование путей совершенствования информационного обеспечения безопасности космической деятельности с учетом новых вызовов, имеющей целью недопущение орбитальных инцидентов. *Материалы и методы.* Решение задачи предлагается путем повышения качества контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых космических систем с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника. Для этого разработан метод комбинирования существенно неравноточных измерений, получаемых от различных средств наблюдения, который может быть использован для составления и ведения каталога потенциально опасных объектов в космосе. *Результаты.* Задача комбинирования измерений и построения прогноза ТНП для каждого спутника сводится к реализации следующего решающего метода: 1) при выявлении отклонений в ТНП спутника, свидетельствующих о совершении им орбитального маневра, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП используются данные последних измерений ТНП, содержащие актуальные параметры движения спутника, вне зависимости от их точности; 2) при наличии неравноточных измерений и данных прогноза ТНП спутника, погрешности которых превышают установленный порог (отличаются более чем на порядок), для последующего прогноза ТНП используются более точные данные; 3) при наличии измерений или данных прогноза ТНП спутника, погрешности которых отличаются менее чем на порядок, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП проводится их совместная обработка. *Выводы.* Предложенный в рамках статьи подход позволяет реализовать ведение каталога и последующего прогноза ТНП при выявлении маневра спутника с выдачей заявки на применение высокоточных средств измерений, а также исключать «грубые» данные из обработки при идентификации опорной орбиты (отсутствии орбитального маневра) низкоточными средствами измерения или устаревшими данными прогноза ТНП спутника.

Ключевые слова: искусственный спутник Земли, объект космического мусора, оптико-электронная система, квантово-оптическая система, радиолокационная станция дальнего обнаружения

Для цитирования: Благодыренко Е. А., Куприянов Н. А., Логунов С. В., Шосталь В. Ю., Шуняков В. А. Метод комбинирования неравноточных измерений параметров движения маневрирующих спутников с целью достижения наилучших точности и достоверности их прогноза // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 14–24. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2

A METHOD OF COMBINING NON-PRECISION MEASUREMENTS OF THE MANEUVERING SATELLITES MOTION PARAMETERS IN ORDER TO ACHIEVE THE BEST ACCURACY AND RELIABILITY OF THEIR FORECAST

E.A. Blagodyrenko¹, N.A. Kupriyanov², S.V. Logunov³,
V.Yu. Shostal⁴, V.A. Shunyakov⁵

^{1,3} Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

² Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots

named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Krasnodar-5, Krasnodar region, Russia

⁴ State Scientific Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg, Russia

⁵ Military Unit 17204 of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Kolomna-1, Moscow region, Russia

¹ blagodyrenroev@mail.ru, ² sektor-ussr@rambler.ru, ³ skobarik83@rambler.ru,

⁴ shostal@mail.ru, ⁵ vase-lek@yandex.ru

Abstract. *Background.* The growing number of man-made space objects in space, the decrease in their size, the launch of multi-satellite space systems into near-earth orbits and the increasing use of maneuvering satellites negatively affect the implementation of space activities due to the increasing likelihood of collisions in space. Therefore, an urgent scientific task is to study ways to improve the information security of space activities, taking into account new challenges, with the aim of preventing orbital incidents. *Materials and methods.* The solution to the problem is proposed by improving the quality of population control of the working and intermediate orbits of multi-satellite space systems with high-precision determination of the current navigation parameters (CNP) of each observed satellite. For this purpose, a method for combining significantly uneven measurements obtained from various means of observation has been developed, which can be used to compile and maintain a catalog of potentially dangerous objects in space. *Results.* The task of combining measurements and building a CNP forecast for each satellite is reduced to the implementation of the following decisive method: 1) when detecting deviations in the satellite's CNP, indicating that it has performed an orbital maneuver, data from recent CNP measurements containing current satellite motion parameters, regardless of their accuracy, are used to maintain a catalog and subsequent CNP forecast; 2) in the presence of non-precision measurements and satellite CNP forecast data, the errors of which exceed the established threshold (differ by more than an order of magnitude), more accurate data are used for the subsequent CNP forecast; 3) in the presence of measurements or data from the satellite's CNP forecast, the errors of which differ by less than an order of magnitude, their joint processing is carried out to maintain the catalog and subsequent CNP forecast. *Conclusions.* The approach proposed in the framework of the article makes it possible to maintain a catalog and subsequent CNP forecast when detecting a satellite maneuver with an application for the use of high-precision measuring instruments, as well as exclude «rough» data from processing when identifying the reference orbit (absence of an orbital maneuver) with low-precision measuring instruments or outdated satellite CNP forecast data.

Keywords: artificial Earth satellite, space debris object, optoelectronic system, quantum optical system, long-range detection radar

For citation: Blagodyrenko E.A., Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Shostal V.Yu., Shunyakov V.A. A method of combining non-precision measurements of the maneuvering satellites motion parameters in order to achieve the best accuracy and reliability of their forecast. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):14–24. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-2

Введение

В настоящее время ведущие космические державы планируют создание, развертывание и запуск в эксплуатацию многоспутниковых космических систем (КС) с количеством искусственных спутников Земли (ИСЗ) вплоть до сотен или тысяч, а в среднесрочной перспективе – до десятков тысяч, размещенных в одной или нескольких орбитальных плоскостях, а также на промежуточных орбитах после кластерных запусков. Конфигурация такой КС может быть охарактеризована понятием «орбитальный слой» (ОС). В качестве примера можно привести реализуемый США проект «Старлинк» [1, 2] и российский проект «Сфера» [3]. Неизбежность выхода из строя ИСЗ, составляющих многоспутниковые системы, а также стохастический характер отказов отдельных спутников порождают риск в десятки раз более активного, чем сейчас, засорения околоземного космического пространства (ОКП). К ОКМ в настоящее время принято относить фрагменты, образующиеся в процессе выведения ИСЗ в ОКП, в том числе отработавшие

пиротехнические и механические устройства, а также фрагменты, появившиеся в результате разрушения ИСЗ.

Подобная эволюция формирования ОКМ может уже в среднесрочной перспективе привести к возникновению эффекта Кessler в отдельно взятом ОС [4, 5]. Кроме трудностей с эксплуатацией самих многоспутниковых систем, построенных по типу ОС, существует проблема, связанная с осуществлением космической деятельности на более высоких орбитах, для которых существует необходимость или пролета сквозь ОС на этапе выведения на более высокие орбиты, или функционирования ИСЗ на высокоэллиптических орбитах. В сложившихся условиях задачи наблюдения за обстановкой в ОКП, контроля заселенности орбит и предупреждения опасных инцидентов, связанных со столкновениями ИСЗ или их повреждением ОКМ, приобретают особую актуальность, особенно в части пилотируемого космоса [5].

Задачи перспективной системы оперативного реагирования на опасные ситуации в околоземном космическом пространстве

Проблема недопущения орбитальных инцидентов формулирует две основные задачи, связанные с наблюдениями и информационным обеспечением безопасности космической деятельности [6]:

1) повышение достоверности и оперативности контроля космической обстановки как обязательного вида обеспечения космической деятельности ближайшего будущего, включающего обнаружение, распознавание, оценивание технического состояния и уточнение параметров орбит всех объектов в ОКП;

2) повышение достоверности и полноты «космической ситуационной осведомленности» как совокупности знаний о каждом спутнике в качестве источника возникновения возможных опасностей для космической деятельности в целом.

Таким образом, задача недопущения орбитальных инцидентов (столкновений ИСЗ друг с другом) требует обеспечения контроля заселенности рабочих и промежуточных орбит многоспутниковых КС с высокоточным определением текущих навигационных параметров (ТНП) каждого наблюдаемого спутника. При этом необходимо учитывать как движение ИСЗ и ОКМ по баллистическим траекториям, так и более сложное, с точки зрения наблюдения спутников, маневрирование ИСЗ с двигателями малой тяги.

Важным фактором обеспечения полноты и достоверности наблюдения за обстановкой в ОКП является необходимость информационного взаимодействия между системами различной государственной принадлежности, выполнения обязательств по обмену эфемеридной и другой информацией о сопровождаемых ИСЗ и планах развертывания многоспутниковых КС, а также учет взаимных интересов и возможных угроз, исходящих от развертывания многоспутниковых систем каждой из стран.

Парирование угроз и опасных ситуаций в космосе должно осуществляться специализированной системой, например, системой оперативного реагирования на угрозы в космосе (СОРУК). В качестве прототипа возможной основы создания и развития СОРУК в России может выступать российская автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в ОКП (АСПОС ОКП), эксплуатируемая госкорпорацией «Роскосмос» [7].

Целью создания СОРУК является обеспечение полноты и достоверности контроля ТНП ИСЗ и ОКМ, прежде всего иностранной принадлежности, по которым существует априорная неопределенность. Информационное обеспечение СОРУК предлагается осуществлять наземными оптическими средствами (НОС), квантово-оптическими средствами (КОС) и радиолокационными станциями дальнего обнаружения (РЛС ДО).

В качестве дополнительных источников информационного обеспечения СОРУК предлагается возможным использовать данные от средств взаимодействующих информационных систем и привлекаемых средств организаций Российской академии наук.

Проведение разнесенных по времени неравноточных измерений текущих навигационных параметров спутников с привлечением разнородных средств наблюдения

В настоящее время в основу выявления опасных ситуаций космической деятельности положен принцип сравнения данных каталога ИСЗ на предмет прогнозирования возможных инцидентов (столкновений, пересечений траекторий) с учетом неопределенности ТНП каждого каталогизированного спутника. Сравнение данных ведется на основе прогнозирования

параметров движения всех каталогизированных ИСЗ с привязкой по времени. Уточнение данных каталога производится по результатам сеансов измерений ТНП ИСЗ информационными средствами перечисленных выше типов и заключается в получении новых векторов оценок ТНП с соответствующими им векторами оценок погрешностей [8].

Пусть $\vec{X}$ – вектор ТНП ИСЗ в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК):

$$\vec{X} = [x, y, z, V_x, V_y, V_z, t]^T, \quad (1)$$

где x, y, z – текущие компоненты радиус-вектора ИСЗ в АГЭСК; V_x, V_y, V_z – текущие компоненты вектора мгновенной скорости ИСЗ в АГЭСК; t – момент времени по шкале UTC, на который получен данный вектор $\vec{X}$.

Соответствующий ему вектор оценок погрешностей определения ТНП ИСЗ $\vec{\sigma}$, компонентами которого являются среднеквадратические отклонения (СКО), можно представить в виде

$$\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t]^T, \quad (2)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}, \sigma_{V_z}, \sigma_t$ – СКО соответствующих компонент вектора $\vec{X}$, включая СКО привязки к шкале времени σ_t .

Фактически комплексной характеристикой движения спутника в любой фиксированный момент времени t будет являться совокупность векторов $\vec{X}$ и $\vec{\sigma}$. При этом векторы погрешностей измерений ТНП определяются в ходе сеанса измерений, исходя из точностных характеристик средства измерения и условий проведения сеанса. Величины погрешностей в основном зависят от типа средства измерения и могут различаться на несколько порядков.

В качестве примера на рис. 1 показана схема проведения разнесенных во времени сеансов оптических измерений ТНП ИСЗ, по результатам каждого из которых получена опорная траектория движения наблюдаемого спутника. Область ошибок ТНП в начале 1-го сеанса измерений формируется за счет погрешности средства измерения (инструментальной погрешности) НОС (КОС) № 1. Аналогично формируется область ошибок ТНП в начале 2-го сеанса измерений. За счет фильтрации измерений на участке наблюдения ИСЗ влияние данной погрешности на оценки ТНП может быть уменьшено, что показано на схеме в виде сужения области разброса. Таким образом, размеры областей ошибок ТНП в конце 1-го и 2-го сеансов измерений будут зависеть от погрешности средств измерений и длин участков наблюдения ИСЗ с пунктов № 1 и 2 соответственно.

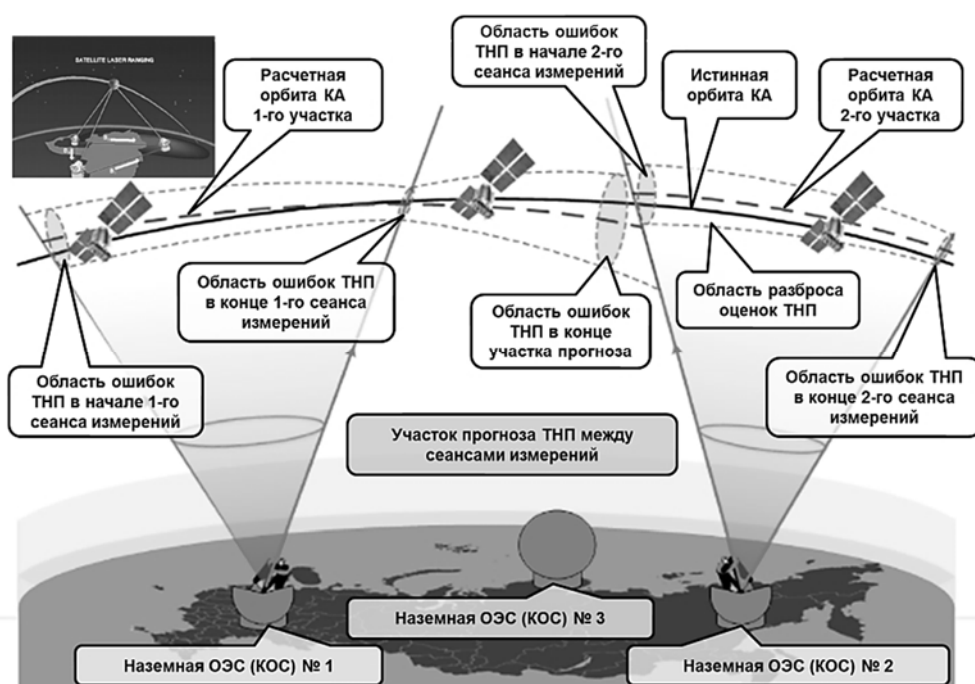


Рис. 1. Схема проведения оптических измерений ТНП ИСЗ и формирования опорных траекторий

По окончании сеанса измерения производится апостериорная обработка результатов и формируется расчетная (опорная) орбита ИСЗ. Вследствие влияния ошибок измерений полученные орбиты будут различаться. На рис. 2 штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в 1-м и 2-м сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия). Расчетная орбита спутника, полученная в результате обработки измерений на первом участке, становится опорной орбитой спутника на участке прогноза ТНП между измерениями. Область ошибок ТНП в конце 1-го сеанса измерений одновременно является областью ошибок начала участка прогноза орбиты ИСЗ между сеансами измерений.

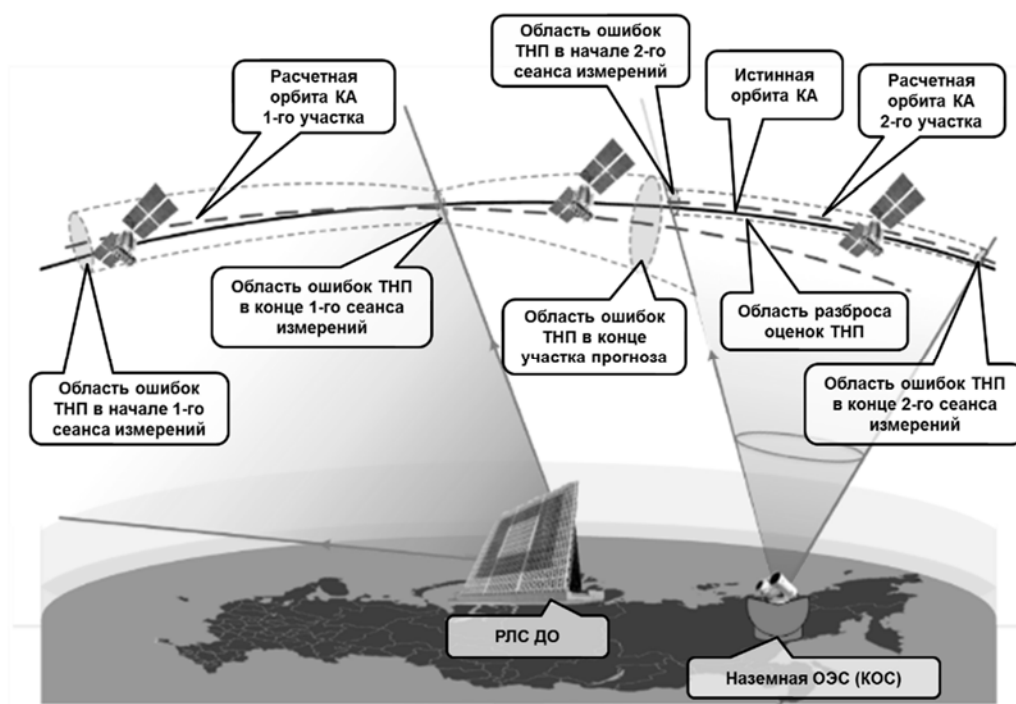


Рис. 2. Схема формирования полей ошибок и прогнозов ТНП ИСЗ при проведении разнесенных по времени неравноточных измерений ТНП ИСЗ с привлечением РЛС ДО и НОС (КОС)

Участок прогноза орбиты ИСЗ между сеансами измерений также имеет область разброса оценок ТНП, которая формируется наличием неопределенностей модели движения ИСЗ, вызванных возмущениями различной природы. Обработка измерений на 2-м участке позволяет построить новые расчетную орбиту и область ошибок определения ТНП ИСЗ. Пересчет поправок к орбите на момент начала 2-го участка дает скачкообразную коррекцию опорной орбиты, а также формирует относительно нее новую область ошибок ТНП, начальный размер которой фактически определяется инструментальной погрешностью НОС (КОС) № 2. При этом в случае корректного выбора моделей движения ИСЗ и формирования области разброса истинная орбита должна оставаться в пределах области разброса оценок ТНП, иначе не будут выполняться требования к полноте и достоверности информации, циркулирующей в СОРУК. Аналогично формируется схема проведения разнесенных во времени сеансов измерений ТНП ИСЗ с использованием РЛС ДО, учитывающая временные и энергетические ограничения по сопровождению ИСЗ [9].

Таким образом, средства рассматриваемых типов обладают взаимодополняющими характеристиками, обобщение которых позволило бы проводить всесуточные всепогодные измерения ТНП неманеврирующих ИСЗ и вести их каталог с точностями, соответствующими разбросу по координатам в пределах десятков сантиметров. При этом РЛС ДО обладают возможностями по оперативному выявлению орбитальных маневров низкоорбитальных ИСЗ, проявляющихся в невязке измерений их местоположения [10], что необходимо для функционирования СОРУК.

Появление многоспутниковых систем существенно усложняет решение данной задачи. При значительно возрастающем потоке измерений, получаемых РЛС ДО, их точности зачастую оказывается недостаточно для определения ТНП ИСЗ с учетом совершения ими орбитального

маневра с использованием двигателей малой тяги, работающих на всем протяжении сеанса наблюдения. Такие двигатели, в частности, используют спутники, входящие в систему «Старлинк», для довыведения на рабочую орбиту после отделения от ракеты-носителя. При этом информационные возможности НОС (КОС), обеспечивающие необходимую точность определения ТНП маневрирующего спутника, ограничены по потоку измерений.

НОС и КОС обладают прецизионной точностью измерений, которая по величине СКО превосходит точность РЛС ДО от двух до пяти порядков. На рис. 3. штриховыми линиями показаны расчетные орбиты, полученные по результатам измерений в 1-м и 2-м сеансах, которые в общем случае не пересекаются и не совпадают с истинной орбитой ИСЗ (сплошная линия). При этом расчетная орбита ИСЗ, полученная по результатам обработки измерений РЛС ДО на первом участке, будет существенно отличаться от истинной орбиты ИСЗ и не попадает в область ошибок измерений НОС (КОС) в начале второго участка. Таким образом, она не может использоваться в качестве опорной орбиты спутника, хотя на снижение информативности самой РЛС ДО это не влияет [11].

Это приводит либо к «выбраковке» всех предыдущих измерений и построению новой опорной орбиты, либо к необходимости «загрубления» измерений НОС (КОС) для последующей совместной обработки.

В случае, если сеанс измерений РЛС ДО следует после сеанса измерений НОС (КОС), то совместная обработка их результатов может существенно повлиять на точность построения новой опорной орбиты по сравнению с результатами измерения, полученными только РЛС ДО. При этом поток измерений, всепогодность и всеуточность РЛС ДО не позволяют отказаться от их использования и перейти только к измерениям НОС (КОС), а с учетом необходимости оперативного выявления фактов совершения ИСЗ орбитальных маневров потенциальный вклад РЛС ДО еще больше возрастает.

Описанное противоречие позволяет сформулировать основную проблему каталогизации низкоорбитальных маневрирующих спутников на основе совместной обработки измерений ТНП (1), полученных от РЛС ДО и НОС (КОС) на разных участках (рис. 1), величины погрешностей которых (2) могут различаться по величине до пяти порядков, т.е. являются существенно неравноточными. Это приводит к ситуации, когда расчетная орбита спутника (штриховая линия 1-го участка), полученная более грубой РЛС ДО, может не попасть в интервал погрешности измерений НОС (КОС) (пунктирная линия 2-го участка), что сделает невозможной их совместную обработку статистическими методами, используемыми при ведении каталога ИСЗ в СОРУК. Иными словами, совместная обработка существенно неравноточных измерений методами теории вероятностей в общем случае нереализуема, а при наличии актуальных высокоточных измерений грубые измерения вообще можно исключить из рассмотрения.

Описанная проблема требует выработки особого подхода к решению задачи совместной обработки существенно неравноточных измерений. Подобная задача в рассматриваемой постановке в других системах измерений и областях техники не встречается.

Ограничения при решении данной задачи обусловлены возможностями СОРУК по контролю низкоорбитальных маневрирующих ИСЗ с учетом значительного увеличения их количества при развертывании многоспутниковых КС. Эти ограничения характеризуются потоками измерений, существенно различающимися для РЛС ДО и НОС (КОС), а также требованиями к погрешностям ТНП (2), которые могут оказаться невыполненными в результате проведения сеанса измерений РЛС ДО.

Данная задача в аналогичных системах, где отсутствовали жесткие требования по точности измерения ТНП, решалась путем «загрубления» более точных измерений (назначением погрешности НОС, соизмеримой с погрешностью РЛС ДО). При этом в существовавших ранее навигационных спутниковых системах на основе низкоорбитальных ИСЗ, где требовалась высокая точность измерения ТНП, информация от РЛС ДО вообще не использовалась.

С точки зрения теории вероятностей проблема совместной обработки измерений ТНП ИСЗ, полученных существенно неравноточными средствами, заключается в несовпадении средневыборочных значений измеряемых параметров с их математическими ожиданиями. В литературе данная проблема описана математически на основе комбинаторики. Это, в свою очередь, приводит к недостоверной интерпретации измерительной информации. В связи с этим для обработки существенно неравноточных измерений требуется новый подход, основанный на вариативном учете измерений, получаемых существенно неравноточными средствами, т.е. на их комбинировании [8].

Постановка задачи комбинирования неравноточных измерений

Будем полагать, что точность РЛС ДО характеризуется величиной погрешности $\bar{\sigma}_{x,y,z1}$, порядка 100 м, а точность НОС (КОС) – $\bar{\sigma}_{x,y,z2}$ порядка 0,1 м, т.е. погрешности РЛС ДО и НОС различаются на три порядка.

Для ведения каталога маневрирующих низкоорбитальных ИСЗ в СОРУК требуется задать точность измерения ТНП $\bar{\sigma}_{x,y,z3}$ не хуже 50 м, а по некоторым спутникам – не хуже 10 м.

При этом к оставшимся компонентам вектора погрешностей (2) на данном этапе требований предъявлять не будем. Следовательно, в этих условиях измерений с использованием только РЛС ДО для ведения каталога низкоорбитальных ИСЗ будет недостаточно.

Таким образом, возникает необходимость разработки методики совместной обработки результатов существенно неравноточных измерений, получаемых РЛС ДО и НОС (КОС) по одному и тому же низкоорбитальному ИСЗ на основе их комбинирования и метода для ее реализации.

На рис. 3 схематично показано соотношение полей ошибок и прогнозов орбиты низкоорбитальных ИСЗ в зоне действия измерительных средств при совместной обработке результатов существенно неравноточных измерений РЛС ДО и НОС (КОС).

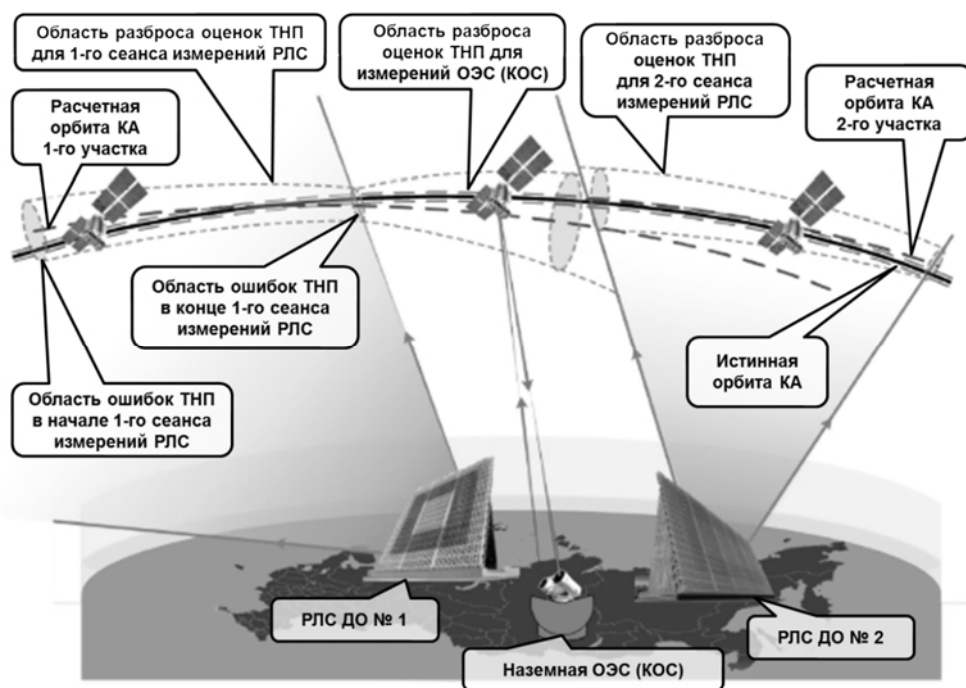


Рис. 3. Соотношение полей ошибок и прогнозов траектории низкоорбитальных ИСЗ при совместной обработке результатов существенно неравноточных измерений РЛС ДО и НОС (КОС)

В этом случае задача минимизации погрешностей ТНП в каталоге ИСЗ или обеспечения требуемых величин погрешностей может быть сформулирована следующим образом [4].

Пусть $\vec{X}_и$ – вектор оценок ТНП ИСЗ, полученный по результатам измерений в текущем сеансе и приведенный к моменту времени t , $\vec{X}_п$ – вектор спрогнозированных ТНП ИСЗ на тот же момент времени t , а $\bar{\sigma}_и$ и $\bar{\sigma}_п$ – соответствующие им вектора погрешностей (СКО) измерений и прогноза.

В этом случае прогноз траектории движения ИСЗ в пределах участка измерений будет характеризоваться массивом $(\vec{X}_п, \bar{\sigma}_п)$, включающим величины ТНП ИСЗ и погрешности их прогноза. Этому участку также соответствует массив результатов измерений $(\vec{X}_и, \bar{\sigma}_и)$, сформированный после обработки результатов сеанса измерений с привязкой по времени.

Решение данной задачи будет основано на разработке метода комбинирования неравноточных измерений ТНП ИСЗ при их совместной обработке в интересах СОРУК.

**Метод комбинирования измерений текущих навигационных параметров
спутников для их совместной обработки в интересах системы
оперативного реагирования на опасные ситуации в космосе**

При наличии измерений ТНП ИСЗ и их прогноза требуется их обобщение, которое может быть реализовано на основе сравнения величин их погрешностей. Сформулируем условия комбинирования измеренных и спрогнозированных ТНП ИСЗ:

– если погрешности прогноза ТНП ИСЗ будут существенно меньше соответствующих погрешностей измерений (для случая РЛС ДО), то обобщение будет сводиться к проверке совпадения данных прогноза с данными измерений без корректировки массива $(\vec{X}_П, \vec{\sigma}_П)$;

– если погрешности измерений ТНП ИСЗ будут существенно меньше соответствующих погрешностей прогноза (для случая НОС и КОС), то требуется изменение прогноза $(\vec{X}_П, \vec{\sigma}_П)$ на основе данных измерений $(\vec{X}_И, \vec{\sigma}_И)$;

– если погрешности прогноза и измерений ТНП ИСЗ будут одного порядка, то целесообразно проводить их комплексирование с получением усредненных оценок, которые в дальнейшем целесообразно рассматривать в качестве уточненного прогноза ТНП ИСЗ.

Данная совокупность условий подходит для любых неманеврирующих ИСЗ, у которых в прогноз орбиты попадает область разброса (поле ошибок) результатов измерений ТНП. Однако если спутник за счет собственной двигательной установки совершает орбитальный маневр, его новая орбита существенно изменится и за короткое время выйдет за пределы поля ошибок полученного ранее прогноза. Поэтому предлагается дополнить обобщение ТНП ИСЗ условием, что если измерения ТНП ИСЗ, полученные в новом сеансе, будут существенно отличаться от прогноза, имеющегося на основе предыдущих сеансов измерений, то новый прогноз должен строиться только на основе результатов новых измерений $(\vec{X}_И, \vec{\sigma}_И)$, какой бы точностью они не характеризовались.

Обобщая вышеизложенное с учетом (1) и (2), можно составить выражение для нахождения итогового вектора ТНП ИСЗ $\vec{X}_\Sigma$ на момент времени t получения обобщенного результата произвольного сеанса измерений в виде метода комбинирования ТНП:

$$\vec{X}_\Sigma = \begin{cases} \vec{X}_И, & \text{если ИСЗ сманеврировал,} \\ \vec{X}_И, & \text{если } |\vec{\sigma}_И| < \vec{e}_{пор1}(\vec{\sigma}_П), \\ \vec{X}_П, & \text{если } |\vec{\sigma}_П| < \vec{e}_{пор2}(\vec{\sigma}_И), \\ F(\vec{X}_И, \vec{X}_П), & \text{если } |\vec{\sigma}_И| \geq \vec{e}_{пор1}(\vec{\sigma}_П) \vee |\vec{\sigma}_П| \geq \vec{e}_{пор2}(\vec{\sigma}_И), \end{cases} \quad (3)$$

где $\vec{e}_{пор1}(\vec{\sigma}_П)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\sigma}_П$; $\vec{e}_{пор2}(\vec{\sigma}_И)$ – пороговое значение, зависящее от $\vec{\sigma}_И$; $F(\vec{X}_И, \vec{X}_П)$ – функциональная зависимость комплексирования векторов измеренных и спрогнозированных ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза.

По аналогии запишется метод комбинирования итогового вектора погрешностей $\vec{\sigma}_\Sigma$:

$$\vec{\sigma}_\Sigma = \begin{cases} \vec{\sigma}_И, & \text{если ИСЗ сманеврировал,} \\ \vec{\sigma}_И, & \text{если } |\vec{\sigma}_И| < \vec{e}_{пор1}(\vec{\sigma}_П), \\ \vec{\sigma}_П, & \text{если } |\vec{\sigma}_П| < \vec{e}_{пор2}(\vec{\sigma}_И), \\ G(\vec{\delta}_И, \vec{\delta}_П), & \text{если } |\vec{\sigma}_И| \geq \vec{e}_{пор1}(\vec{\sigma}_П) \vee |\vec{\sigma}_П| \geq \vec{e}_{пор2}(\vec{\sigma}_И), \end{cases} \quad (4)$$

где $G(\vec{\delta}_И, \vec{\delta}_П)$ – функциональная зависимость комплексирования векторов погрешностей измерений и прогноза ТНП ИСЗ при соизмеримых величинах погрешностей измерений и прогноза.

Последние выражения в условиях (3) и (4) фактически соответствуют случаю невыполнения первых трех условий и представляют собой результат комплексирования измеренного и спрогнозированного значений.

Заключение

Таким образом, задача комбинирования измерений и построения прогноза ТНП для каждого спутника будет сводиться к реализации следующего решающего метода:

1) при выявлении отклонений в ТНП ИСЗ, свидетельствующих о совершении им орбитального маневра, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП используются данные последних измерений ТНП, содержащие актуальные параметры движения ИСЗ, вне зависимости от их точности (верхняя строчка выражения (4));

2) при наличии неравноточных измерений и данных прогноза ТНП ИСЗ, погрешности которых превышают установленный порог (отличаются более чем на порядок), для последующего прогноза ТНП используются более точные данные (условия (2) и (3) выражения (4));

3) при наличии измерений или данных прогноза ТНП ИСЗ, погрешности которых отличаются менее чем на порядок, для ведения каталога и последующего прогноза ТНП проводится их совместная обработка, т.е. комплексирование (нижняя строчка выражения (4)).

Это позволит реализовать описанный решающий метод для комбинирования и принятия решения на использование выбранных на его основе данных:

– для ведения каталога и последующего прогноза ТНП КО – при выявлении маневра ИСЗ с выдачей заявки на применение высокоточных средств измерений, под которыми понимаются ОЭС (КОС);

– для исключения «грубых» данных из обработки – при идентификации опорной орбиты (отсутствии орбитального маневра) низкоточными средствами измерения или устаревшими данными прогноза ТНП ИСЗ.

Список литературы

1. Ключников, В.Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 32–43.
2. Цыгикало Н.А. Группировка Starlink – система орбитального перехвата принципиально нового типа // Naked science. URL: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (дата обращения: 01.03.2024).
3. Суханов С. А., Шаргородский В. Д., Шилин В. Д. Система контроля космического пространства. М.: Правда, 2011. 206 с.
4. Благодыренко Е. В., Горбенков С. П., Царев С. М., Шосталь В. Ю. Комбинирование неравноточных измерений параметров движения маневрирующих космических объектов // 77-я НТК СПб НТОРЭС. СПб., 2022. С. 56–58.
5. Калюта А. Н. Глобальный мониторинг космической обстановки – важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере // Военная мысль. 2017. № 9. С. 5–11.
6. Благодыренко Е. В., Шосталь В. Ю. Исследование парадокса закона больших чисел при совместной обработке существенно неравноточных измерений // 76-я НТК СПб НТОРЭС. СПб., 2021. С. 98–100.
7. Солнцев А. М., Ключня А. Ю. Применение противоспутникового оружия: международно-правовые проблемы // Обозреватель-Observer. 2013. № 3. С. 57–74.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 10-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
9. Логунов С. В., Куприянов Н. А. Методика ранжирования каталогизированных космических объектов, используемых для повышения точности определения координат объектов радиолокационной станцией дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2019. № 1. С. 75–84. EDN: ZBNECD
10. Кондыбаев Н. С., Куприянов Н. А., Куракин С. З. Алгоритм траекторной обработки информации радиолокационных измерительных комплексов на основе кластеризации методом K-MEANS // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 4–10. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
11. Куприянов Н. А., Логунов С. В., Хегай Д. К. [и др.] Модель оценивания информативности высокоширотного траекторного измерительного комплекса // Наукоемкие технологии. 2021. Т. 22, № 3. С. 89–97. doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL

References

1. Klyushnikov V.Yu. Kessler syndrome: will the road to space be closed? *Vozdushno-kosmicheskaya sfera = The aerospace sphere*. 2021;(4):32–43. (In Russ.)
2. Tsygikalo N.A. Starlink grouping – an orbital interception system of a fundamentally new type. *Naked science*. (In Russ.). Available at: <https://naked-science.ru/article/tech/starlink-perehvat> (accessed 01.03.2024).

3. Sukhanov S.A., Shargorodskiy V.D., Shilin V.D. *Sistema kontrolya kosmicheskogo prostranstva = Space control system*. Moscow: Pravda, 2011:206. (In Russ.)
4. Blagodyrenko E.V., Gorbenkov S.P., Tsarev S.M., Shostal' V.Yu. Combining non-precision measurements of motion parameters of maneuvering space objects. *77-ya NTK SPb NTORES = 77th STK SPb NTORES*. Saint Petersburg, 2022:56–58. (In Russ.)
5. Kalyuta A.N. Global monitoring of the space situation – the most important direction of ensuring military security of the Russian Federation in the aerospace sphere. *Voennaya mysl' = Military Thought*. 2017;(9): 5–11. (In Russ.)
6. Blagodyrenko E.V., Shostal' V.Yu. Investigation of the paradox of the law of large numbers in the joint processing of substantially non-precision measurements. *76-ya NTK SPb NTORES = 76th STK SPb NTORES*. Saint Petersburg, 2021:98–100. (In Russ.)
7. Solntsev A.M., Klyunya A.Yu. The use of anti-satellite weapons: international legal problems. *Obozrevatel'-Observer*. 2013;(3):57–74. (In Russ.)
8. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov. 10-e izd., ster. = Probability theory : textbook for universities. 10th ed., ster.* Moscow: Vyssh. shk., 2006:575. (In Russ.)
9. Logunov S.V., Kupriyanov N.A. Methodology for ranking cataloged space objects used to improve the accuracy of determining the coordinates of objects by a long-range radar station. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya = Radio electronics issues. Ser.: Television technology*. 2019;(1):75–84. (In Russ.). EDN: ZBNECD
10. Kondybaev N.S., Kupriyanov N.A., Kurakin S.Z. Algorithm of trajectory information processing of radar measuring complexes based on clustering by the K-MEANS method. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High-tech technologies in space exploration of the Earth*. 2020;12(6):4–10. (In Russ.). doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-4-10 EDN: GXVCKO
11. Kupriyanov N.A., Logunov S.V., Khegay D.K. et al. A model for evaluating the informativeness of a high-latitude trajectory measuring complex. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech technologies*. 2021;22(3): 89–97. (In Russ.). doi: 10.18127/j19998465-202103-10 EDN: YJIEYL

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Александрович Благодыренко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры космической
радиолокации и радионавигации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: blagodyrenroev@mail.ru

Evgeny A. Blagodyrenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Николай Александрович Куприянов

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструкции
и эксплуатации авиационной техники,
Краснодарское высшее военное авиационное
училище летчиков имени Героя Советского
Союза А. К. Серова
(Россия, Краснодарский край,
г. Краснодар-5, ул. Дзержинского, 135)
E-mail: sektor-ussr@rambler.ru

Nikolay A. Kupriyanov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of aviation engineering design and operation,
Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots
named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov
(135 Dzerzhinskiy street, Krasnodar-5,
Krasnodar region, Russia)

Сергей Владимирович Логунов

кандидат технических наук,
докторант кафедры космической
радиолокации и радионавигации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: skobarik83@rambler.ru

Sergey V. Logunov

Candidate of technical sciences,
doctoral student of the sub-department
of space radar and radio navigation,
Mozhaisky Military Space Academy
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Вячеслав Юрьевич Шосталь

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Государственный научно-исследовательский
институт прикладных проблем
(Россия, г. Санкт-Петербург,
набережная Обводного канала, 29)
E-mail: shostal@mail.ru

Vyacheslav Yu. Shostal

Candidate of technical sciences, research associate,
State Scientific Research Institute
of Applied Problems
(29 Embankment of the Obvodny Canal,
St. Petersburg, Russia)

Василий Александрович Шуняков

инженер отдела боевого управления,
Войсковая часть 17204
Министерства обороны Российской Федерации
(Россия, Московская область, г. Коломна-1)
E-mail: vase-lek@yandex.ru

Vasily A. Shunyakov

Engineer of the combat control department,
Military Unit 17204 of the Ministry of Defense
of the Russian Federation
(Kolomna-1, Moscow region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 22.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2024

Принята к публикации/Accepted 13.05.2024

УДК 534.6.08
doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

К. В. Фролов¹, Л. М. Инаходова²

^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
¹riksot@mail.ru, ²inakhodova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важной составляющей жизнеспособности электрического оборудования является своевременная диагностика его основных узлов, позволяющая продлить срок службы и снизить затраты на его эксплуатацию. Диагностика комплектных распределительных устройств может осуществляться как в испытательных лабораториях, так и в условиях эксплуатации на подстанциях с использованием различного диагностического оборудования. От эффективности работы диагностических устройств зависит качество функционирования подстанций и бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии. В настоящее время существует множество методов диагностирования электрического оборудования для выявления повреждений на ранней стадии развития дефекта. Использование устройств на основе акустического метода позволяет осуществлять раннюю диагностику для предупреждения аварийной ситуации на подстанции. Целью работы является определение параметров акустического шума, позволяющих обнаружить возникновение дефекта электрооборудования. *Актуальность темы* обусловлена необходимостью бесперебойного электроснабжения потребителей и минимизацией затрат на эксплуатацию электрооборудования. *Материалы и методы.* Исследования основываются на применении методов спектрального анализа с использованием преобразования Фурье и вейвлет-преобразования применительно к задачам определения информационных параметров акустического шума. *Результаты.* Представлены обзор и краткий анализ акустических исследований исправных и неисправных комплектных распределительных устройств, описание изменения информационных параметров акустического шума. *Выводы.* Представленные экспериментальные исследования акустических шумов и определение их информационных параметров могут быть использованы при создании информационно-измерительной системы диагностики комплектных распределительных устройств для выявления предаварийных состояний электрооборудования в составе комплектных распределительных устройств.

Ключевые слова: акустический шум, параметры акустического шума, диагностика комплектных распределительных устройств, вейвлет-преобразование, спектральный анализ

Для цитирования: Фролов К. В., Инаходова Л. М. Экспериментальное исследование информационных параметров акустического шума // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 25–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

EXPERIMENTAL STUDY OF INFORMATION PARAMETERS OF ACOUSTIC NOISE

K.V. Frolov¹, L.M. Inakhodova²

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russia
¹riksot@mail.ru, ²inakhodova@mail.ru

Abstract. *Background.* An important component of the viability of electrical equipment is the timely diagnosis of its main components, which allows to extend the service life and reduce the cost of its operation. Diagnostics of complete switchgear can be carried out both in testing laboratories and in operating conditions at substations using various diagnostic equipment. The quality of substation operation and uninterrupted power supply to electricity consumers depend on the efficiency of diagnostic devices. Currently, there are many methods for diagnosing electrical equipment to detect damage at an early stage of defect development. The use of devices based on the acoustic method allows for early diagnosis to prevent an emergency situation at the substation. The purpose of the work is to determine the parameters of acoustic noise, allowing to detect the occurrence of an electrical defect. The relevance of the topic is due to the need for uninterrupted power supply to consumers and minimizing the cost of operating electrical equipment. *Materials and methods.* The research is based on the application of spectral analysis methods using the Fourier transform and the wavelet

transform in relation to the tasks of determining the information parameters of acoustic noise. *Results.* An overview and a brief analysis of acoustic studies of serviceable and faulty complete switchgear are presented, as well as a description of changes in the information parameters of acoustic noise. *Conclusion.* The presented experimental studies of acoustic noise and the determination of their information parameters can be used to create an information and measurement diagnostic system for complete switchgear to identify pre-emergency conditions of electrical equipment as part of complete switchgear.

Keywords: acoustic noise, acoustic noise parameters, diagnostics of complete switchgear, wavelet transform, spectral analysis

For citation: Frolov K.V., Inakhodova L.M. Experimental study of information parameters of acoustic noise. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):25–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

Введение

Непрерывная подача электроэнергии является необходимостью для функционирования производственных предприятий, а также для обеспечения комфортного проживания граждан. От надежности электроэнергетических установок зависит оптимальное использование финансовых ресурсов страны и обеспечение государственной безопасности. Утвержденные требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок определяют правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Так, одним из важнейших компонентов современных электросетей является электрическая подстанция, включающая в себя комплектные распределительные устройства [1, 2]. Они предназначены для распределения электрической энергии переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц и номинальным напряжением 6, 10 кВ.

Комплектные распределительные устройства поставляются в виде металлического шкафа со встроенным электрооборудованием, включающим в себя измерительные приборы, управляющие контуры, автоматику и релейную защиту [3]. Все элементы комплектных распределительных устройств требуют проведения диагностических работ во время эксплуатации. Одними из таких высоковольтных устройств являются высоковольтные изоляторы. Высоковольтные изоляторы подвергаются электродинамическим и механическим воздействиям, что приводит к деградации диэлектрических поверхностей, а также возникновению дефектов и, как следствие, к выходу из строя. Установлено, что при возникновении дефектов высоковольтных изоляторов возникают дуговые и частичные разряды, вызванные пробоем изолирующей среды под воздействием приложенного электрического напряжения [4, 5].

Непрерывный мониторинг состояния изоляции комплектных распределительных устройств является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии [6, 7]. В настоящее время в диагностике высоковольтного оборудования широко применяются системы на основе контактных методов. К их основным недостаткам можно отнести, во-первых, необходимость личного присутствия оператора на объекте вблизи опасного для жизни высоковольтного оборудования, во-вторых, низкая периодичность поступления данных о характеристиках оборудования с труднодоступных подстанций, в-третьих, необходимость вывода из эксплуатации аппаратов электрооборудования для монтажа компонентов систем диагностики. В настоящей работе предлагается использовать бесконтактный акустический метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации звукового шума, возникающего при появлении дуговых и частичных разрядов [8].

Материалы и методы

Испытания проводились на ячейках КРУ, расположенных в испытательной лаборатории завода АО «ГК "Электрощит" – ТМ Самара». Для реализации акустического метода было разработано устройство, регистрирующее звуковые колебания по двум каналам в диапазоне от 100 Гц до 80 МГц [9]. Двухканальный метод фиксации акустического шума обусловлен необходимостью учета воздействия акустического шума, находящегося за пределами ячейки КРУ. Акустические колебания регистрировались внутри ячейки КРУ через канал 1, а также снаружи ячейки КРУ через канал 2. Структурная схема реализации метода представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема реализации акустического метода

Устройство было поочередно установлено в ячейках КРУ с исправными и дефектными элементами (изоляторы, трансформатор тока). Сбор акустического шума проводился в нескольких точках в среднем и нижнем отсеках комплектного распределительного устройства, также производилась регистрация внешнего шума за пределами ячейки КРУ. Измерения акустического шума проводились при напряжениях от 10 до 45 кВ с шагом 5 кВ. При напряжении более 45 кВ происходил пробой изоляции, что приводило к отключению установки. Сигнал с устройства передавался на персональный компьютер через аналогово-цифровой преобразователь с разрядностью 14 бит и частотой дискретизации 5 МГц.

Результаты

В целях исследования информационных параметров акустического шума проведено более 200 замеров длительностью 1–2 мин. На каждом полученном сигнале наблюдается явление интерференции, при этом складывающиеся волны имеют разные частоты, амплитуды, фазы и результирующая кривая сигнала имеет достаточно сложный вид (рис. 2).

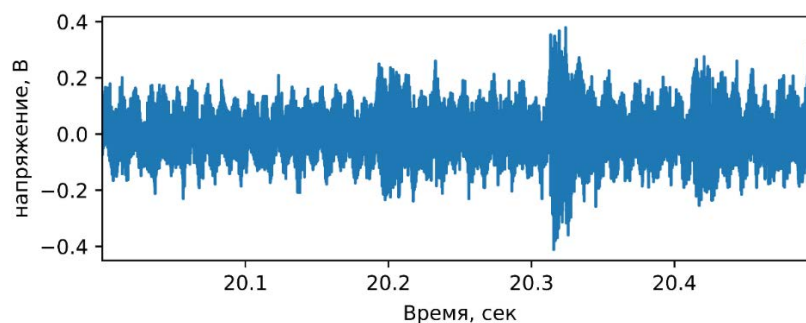


Рис. 2. Амплитудно-временное представление сигнала

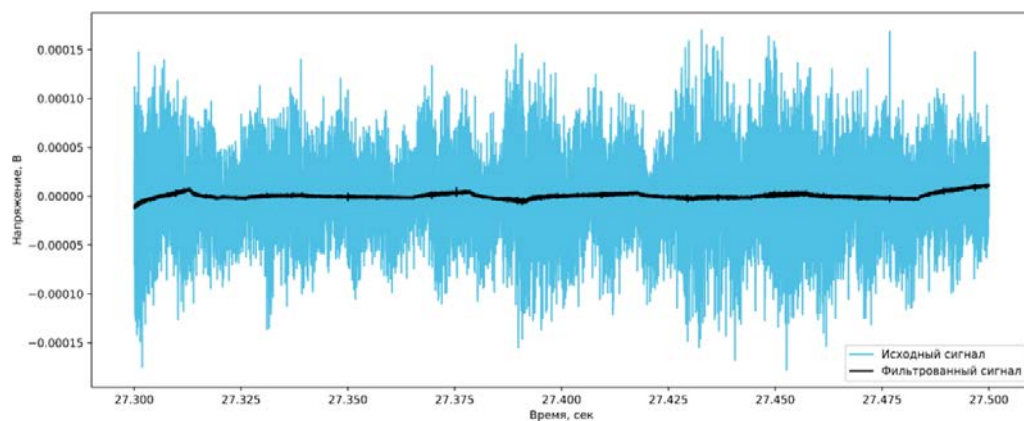
Полученный сигнал $u(t)$ представляет собой стохастический процесс, включающий в себя информативную $u_{\text{ин}}(t)$ и случайную $u_{\text{сл}}(t)$ составляющие:

$$u(t) = u_{\text{ин}}(t) + u_{\text{сл}}(t).$$

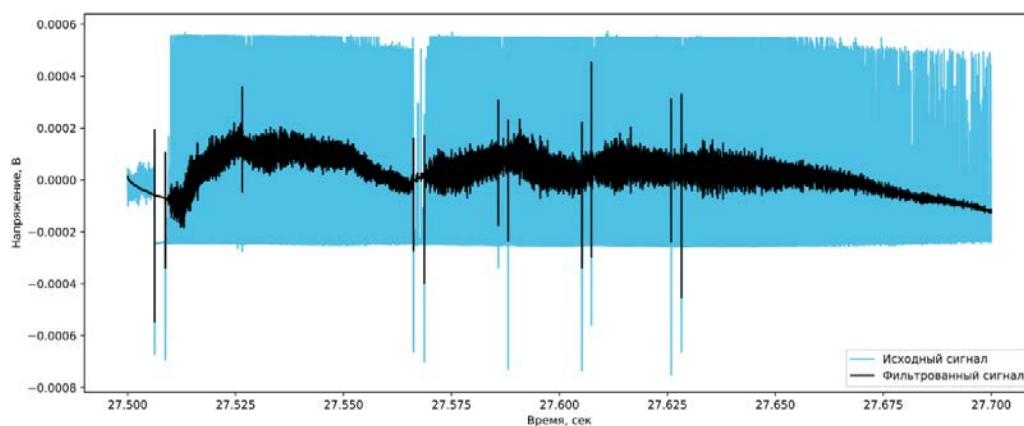
Информативная составляющая выделяется путем использования вейвлет-фильтрации, включающей в себя три этапа: прямое вейвлет-преобразование (декомпозиция); вычисление коэффициентов разложения сигнала; обратное вейвлет-преобразование (реконструкция) с использованием рассчитанных коэффициентов [10–12]. Для анализа полученного сигнала разработана программа на языке программирования Python с использованием математических библиотек numpy, SciPy, PyWavlets, scikit-image. Вейвлет-фильтрация осуществлена через вейвлеты Добеши [13]. Достаточно эффективными оказались вейвлеты db2 со следующими наборами весовых вейвлет-коэффициентов [14]:

$$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

На рис. 3 показаны единичные фрагменты длительностью 0,3 с для исправного и дефектного КРУ с выделением информативной составляющей фильтрованного сигнала $u_{\text{ин}}(t)$ и исходного сигнала $u(t)$.



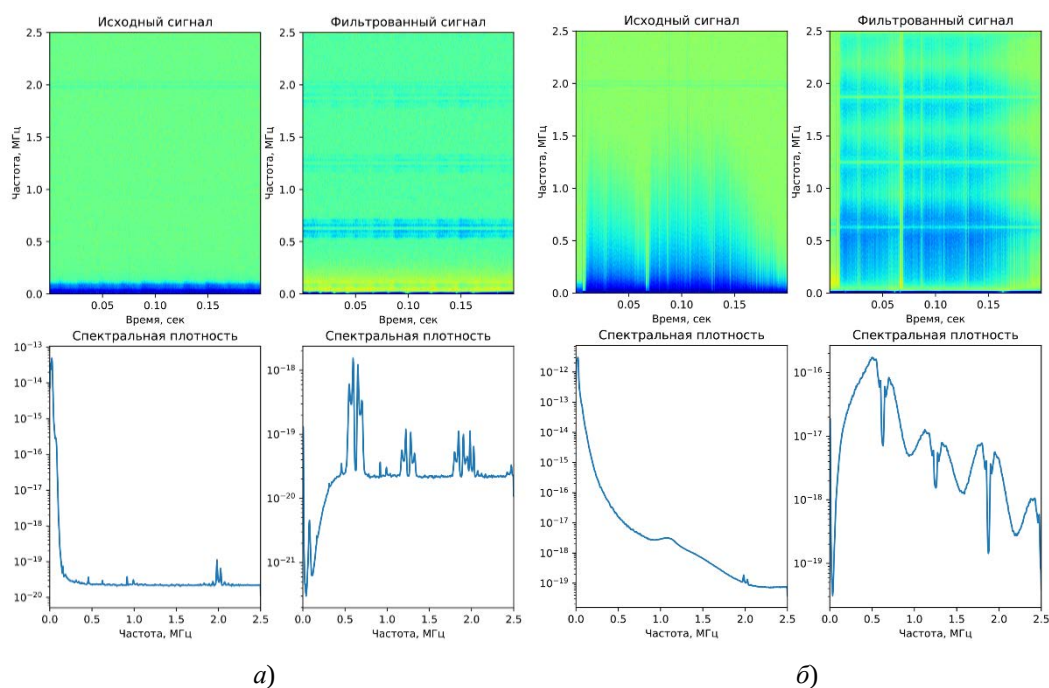
а)



б)

Рис. 3. Исходный и фильтрованный сигналы исправного (а) и дефектного (б) КРУ

Для получения частотных характеристик сигнала использовался спектральный анализ, позволяющий судить о наличии дефекта в частотном представлении, так как во временном представлении сигнал слабо информативен. На рис. 4 изображены спектрограммы и спектральные плотности исходного и фильтрованного сигналов исправного и дефектного КРУ.



а)

б)

Рис. 4. Спектрограммы и спектральные плотности сигналов исправного (а) и дефектного (б) КРУ

При исследовании множества фрагментов сигнала в различных условиях работы КРУ было выявлено, что характерным свойством полученных спектрограмм проведенных замеров служит экспоненциальный характер распределения спектральной плотности сигналов (рис. 5):

$$P(f) = ae^{-bf},$$

где a, b – коэффициенты распределения спектральной плотности; f – частота сигнала.

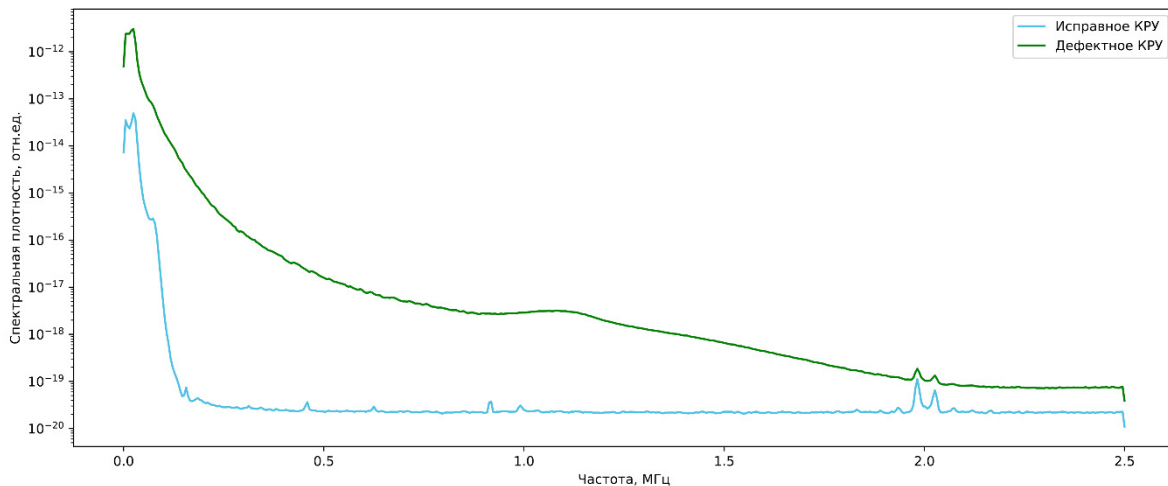


Рис. 5. Распределения спектральной плотности сигналов

Общим критерием по отношению ко всему множеству спектрограмм сигналов дефектных КРУ в сравнении с исправными КРУ является снижение значения коэффициента спектральной плотности b более чем в 10 раз.

Заключение

Проведенный анализ результатов экспериментального исследования информационных параметров акустического шума показал, что акустические сигналы КРУ в исправном состоянии имеют достаточно низкую спектральную плотность на частотах выше 0,2 МГц, в то же время при наличии дефекта в устройстве спектральная плотность на тех же частотах значительно увеличивается. Данный факт позволит выявлять дефектные состояния исследуемого электрооборудования, а также разработать информационно-измерительную систему для предотвращения аварийных ситуаций в энергосистемах.

Список литературы

1. Красник В. В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств : производ.-практ. пособие. М. : ЭНАС, 2016. 319 с.
2. Дорошев К. И. Комплектные распределительные устройства напряжением 3–35 кВ. М. : Энергия, 1969. 103 с.
3. Комплектные распределительные устройства КРУ // Производственное объединение «ВЭЛТА». URL: <https://po-velta.ru/production/komplektnye-raspredelitelnye-ustroystva-kru> (дата обращения: 18.03.2024).
4. Мягих К. Ю., Иванов Д. А., Галиева Т. Г. [и др.]. Визуализация и локализация дефектов изоляции высоковольтного оборудования акустическим методом // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № 1. С. 2–9.
5. Инаходова Л. М., Фролов К. В. Исследование звукового излучения контактных соединений распределительных устройств подстанций // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4. С. 26–32. doi: 10.53015/18159958_2021_4_26
6. Голенищев-Кутузов А. В., Ахметвалеева Л. В., Еникеева Г. Р. [и др.]. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 2. С. 117–127. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127
7. Патент 2764962 С1 Российская Федерация. Способ и система планирования профилактического обслуживания и ремонта технологического оборудования на основе акустической диагностики

- с применением нейронных сетей / Власов А. В., Киселев А. В., Михайлов Д. М. № 2021117490 ; заявл. 16.06.2021 ; опубл. 24.01.2022.
8. Фролов К. В., Инаходова Л. М. Метод определения неисправности электрических изоляторов // Энергетика будущего – цифровая трансформация : сб. тр. III Всерос. науч.-практ. конф. (г. Липецк, 14–15 декабря 2022 г.). Липецк : Липецк. гос. техн. ун-т, 2022. С. 48–52.
 9. Патент 2815081 С1 Российская Федерация. Устройство защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л. М., Цынаева А. А., Фролов К. В. № 2023122367 ; заявл. 29.08.2023 ; опубл. 11.03.2024.
 10. Козырев А. А. Метод, модели и алгоритмы обработки информации при регистрации и принятии решений об аварийных процессах в системах электропитания : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2015. 24 с.
 11. Файфер Л. А. Анализ нестационарных сигналов с помощью вейвлет-преобразования // Молодой ученый. 2016. № 14. С. 182–186.
 12. Файфер Л. А. Применение вейвлет-преобразования для идентификации высокочастотных составляющих // Молодой ученый. 2016. № 14. С. 186–189.
 13. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам : пер. с англ. М. : Изд-во «РХД», 2001. 450 с.
 14. Нагорнов О. В. Вейвлет-анализ в примерах : учеб. пособие. М. : НИЯУ МИФИ, 2010. 120 с.

References

1. Krasnik V.V. *Ekspluatatsiya elektricheskikh podstantsiy i raspreditel'nykh ustroystv: proizvod.-prakt. posobie = Operation of electrical substations and switchgears : production.- practice. manual*. Moscow: ENAS, 2016:319. (In Russ.)
2. Doroshev K.I. *Komplektnye raspreditel'nye ustroystva napryazheniem 3-35 kV = Complete switchgears with a voltage of 3-35 kV*. Moscow: Energiya, 1969:103. (In Russ.)
3. Complete switchgear of the KRU. *Proizvodstvennoe ob"edinenie «VELTA» = Production association "VELTA"*. (In Russ.). Available at: <https://po-velta.ru/production/komplektnye-raspreditelnye-ustroystva-kru> (accessed 18.03.2024).
4. Myagkikh K.Yu., Ivanov D.A., Galieva T.G. et al. Visualization and localization of insulation defects of high-voltage equipment by acoustic method. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*. 2024;(1):2–9. (In Russ.)
5. Inakhodova L.M., Frolov K.V. Investigation of sound radiation of contact connections of switchgear substations. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya = Vesti higher educational institutions of the Chernozem region*. 2021;(4):26–32. (In Russ.). doi: 10.53015/18159958_2021_4_26
6. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R. et al. Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;22(2):117–127. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127
7. Patent 2764962 C1 Russian Federation. *Sposob i sistema planirovaniya profilakticheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhnologicheskogo oborudovaniya na osnove akusticheskoy diagnostiki s primeneniem neyronnykh setey = Method and system for planning preventive maintenance and repair of technological equipment based on acoustic diagnostics using neural networks*. Vlasov A.V., Kiselev A.V., Mikhaylov D.M. № 2021117490; appl. 16.06.2021; publ. 24.01.2022. (In Russ.)
8. Frolov K.V., Inakhodova L.M. Method for determining the malfunction of electrical insulators. *Energetika budushchego – tsifrovaya transformatsiya: sb. tr. III Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Lipetsk, 14–15 dekabrya 2022 g.) = Energetics of the future – digital transformation : sat. tr. III All-Russian Scientific and Practical Conference (Lipetsk, December 14-15, 2022)*. Lipetsk: Lipetsk. gos. tekhn. un-t, 2022:48–52. (In Russ.)
9. Patent 2815081 C1 Russian Federation. *Ustroystvo zashchity ot dugovykh i chastichnykh razryadov = Protection device against arc and partial discharges*. Inakhodova L.M., Tsynaeva A.A., Frolov K.V. № 2023122367; appl. 29.08.2023; publ. 11.03.2024. (In Russ.)
10. Kozыrev A.A. Method, models and algorithms of information processing during registration and decision-making on emergency processes in power supply systems. PhD abstract. Volgograd, 2015:24. (In Russ.)
11. Fayfer L.A. Analysis of nonstationary signals using a wavelet transform. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2016;(14):182–186. (In Russ.)
12. Fayfer L.A. Application of the wavelet transform for identification of high-frequency components. *Molodoy uchenyy = Young Scientist*. 2016;(14):186–189. (In Russ.)
13. Dobeshi I. *Desyat' lektsiy po veyvletam: per. s angl. = Ten lectures on wavelets : translated from English*. Moscow: Izd-vo «RKhD», 2001:450. (In Russ.)
14. Nagornov O.V. *Veyvlet-analiz v primerakh: ucheb. posobie = Wavelet analysis in examples : textbook*. Moscow: NIYaU MIFI, 2010:120. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Кирилл Владимирович Фролов**

аспирант,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: riksot@mail.ru

Kirill V. Frolov

Postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Лолита Меджидовна Инаходова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: inahodova@mail.ru

Lolita M. Inakhodova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of automated electric power systems,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2024

Принята к публикации/Accepted 15.05.2024

МЕТОД СИНТЕЗА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ЗАМКНУТОГО ВИДА С ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОЙ И ФИНИТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ВЕСОВОЙ ФУНКЦИЕЙ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Б. В. Чувькин¹, И. А. Долгова²

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

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² dolgovair@mail.ru

Аннотация. *Актуальность цели.* Рассматривается метод синтеза аналого-цифровых фильтров замкнутого вида с линейной фазой и финитной импульсной весовой функцией. Их применение в многоканальных информационно-измерительных системах обеспечивает минимальные фазовые искажения и высокую точность межканальной синхронизации измерительных сигналов. *Материалы и методы.* Рассмотрены вопросы синтеза передаточных функций аналого-цифровых фильтров замкнутого вида, имеющих линейную фазочастотную характеристику и финитную импульсную весовую функцию. Новизна метода синтеза заключается в использовании элементов теории финитных функций для формализации необходимых и достаточных математических условий достижения этих характеристик. Рассмотрены варианты типовых звеньев, входящих в структуру аналого-цифровых фильтров замкнутого вида и математические формулы, необходимые для расчета их передаточных функций. *Результаты.* Описаны этапы проектирования аналого-цифровых фильтров с многопетлевой структурой замкнутого вида, финитной импульсной весовой функцией и линейной фазочастотной характеристикой. Приведены примеры проектирования аналого-цифровых фильтров замкнутого вида, относящихся к классу интегрирующих дискретизаторов. Приведены аналитические формулы и пример расчета коэффициентов передаточных функций интегрирующих дискретизаторов до четвертого порядка. *Выводы.* Теоретически доказано и проиллюстрировано, что при выполнении необходимых и достаточных математических условий аналого-цифровые фильтры замкнутого вида могут иметь линейную фазочастотную характеристику и финитную импульсную весовую функцию. Предложенный метод синтеза аналого-цифровых фильтров может быть использован в качестве дополнения к существующим алгоритмам автоматизированного проектирования аналоговых и цифровых фильтров. Практическая реализация фильтров перспективна на базе программируемых аналого-цифровых интегральных схем.

Ключевые слова: аналого-цифровой фильтр, линейная фаза, финитная функция, интегрирующий дискретизатор

Для цитирования: Чувькин Б. В., Долгова И. А. Метод синтеза аналого-цифровых фильтров замкнутого вида с линейной фазой и финитной импульсной весовой функцией для многоканальных информационно-измерительных систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 32–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-4

METHOD OF SYNTHESIS OF ANALOG-DIGITAL CLOSED-FORM FILTERS WITH LINEAR PHASE AND FINISHED PULSE WEIGHTING FUNCTION FOR MULTI-CHANNEL INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

B.V. Chuvykin¹, I.A. Dolgova²

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

¹ chuvukin_bv@mail.ru, ² dolgovair@mail.ru

Abstract. *Background.* The article discusses a method for synthesizing closed-form analog-to-digital filters with linear phase and finite pulse weighting function. Their use in multichannel information-measuring systems ensures minimal phase distortion and high accuracy of interchannel synchronization of measuring signals. *Materials and methods.* The issues of synthesizing transfer functions of closed-form analog-digital filters having a linear phase-frequency response and a finite pulse weighting function are considered. The novelty of the synthesis method lies in the use of elements of the theory of finite functions to formalize the necessary and sufficient mathematical conditions for achieving these characteristics. Variants of typical links included in the structure of closed-type analog-digital filters and the mathematical formulas

necessary for calculating their transfer functions are considered. *Results.* The stages of designing analog-digital filters with a closed-loop multi-loop structure, a finite pulse weight function and a linear phase-frequency response are described. Examples are given of the design of closed-type analog-to-digital filters belonging to the class of integrating samplers. Analytical formulas and an example of calculating the coefficients of transfer functions of integrating discretizers up to the fourth order are given. *Conclusions.* It has been theoretically proven and illustrated that, if necessary and sufficient mathematical conditions are met, closed-form analog-to-digital filters can have a linear phase-frequency response and a finite pulse weighting function. The proposed method for synthesizing analog-digital filters can be used as a complement to existing algorithms for computer-aided design of analog and digital filters. The practical implementation of filters is promising on the basis of programmable analog-digital integrated circuits.

Keywords: analog-to-digital filter, linear phase, finite function, integrating sampler

For citation: Chuvykin B.V., Dolgova I.A. Method of synthesis of analog-digital closed-form filters with linear phase and finished pulse weighting function for multi-channel information-measuring systems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):32–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-4

В настоящее время для решения задачи контроля и наблюдения за множеством однотипных объектов широко используются многоканальные информационно-измерительные системы. В многоканальных информационно-измерительных системах, на этапе аналого-цифровой фильтрации измерительных сигналов, необходимо обеспечивать высокую точность межканальной синхронизации измерительных сигналов и минимальные амплитудно-частотные и фазочастотные искажения. Однако построение аналого-цифровых фильтров (АЦФ), вносящих в заданной полосе частот минимальные амплитудно-частотные и фазочастотные искажения, – достаточно сложная задача [1].

Минимизация канальных фазовых искажений обеспечивается путем использования цифровых фильтров (ЦФ) с конечной (финитной) импульсной характеристикой (КИХ-фильтры), импульсная весовая функция которых обладает свойством центральной симметрии. Такие фильтры имеют линейную фазочастотную характеристику и не вносят фазовые искажения [2].

Основную долю фазовых искажений в измерительные сигналы вносят аналоговые фильтры (АФ) в силу наличия полюсов в их передаточных функциях. Они имеют нелинейную фазочастотную характеристику и неограниченную по времени экспоненциально затухающую импульсную весовую функцию. Для снижения фазовых искажений АФ применяют специальные фильтры высоких порядков, например фильтры Бесселя, что, однако, существенно усложняет техническую реализацию и вносит дополнительные инструментальные погрешности [3].

Фазовые искажения, которые вносят рекурсивные АФ, частично могут быть уменьшены за счет введения в измерительный канал дополнительных корректирующих цифровых фильтров, что, однако, увеличивает групповое временное запаздывание измерительного сигнала [4].

Идеальным техническим решением задачи синтеза аналого-цифровых фильтров с линейной фазочастотной характеристикой может быть получено за счет использования сложных АЦФ или аналого-дискретных фильтров (без промежуточного аналого-цифрового преобразования) со структурой замкнутого вида. Такие фильтры имеют замкнутую структуру и включают прямой канал аналого-цифрового (аналого-дискретного) преобразования и (дискретно-аналогового) цифроаналоговый канал обратной связи [5]. Особенностью данного класса АЦФ является то, что при выполнении определенных математических условий они могут иметь симметричную финитную импульсную весовую функцию, которая обеспечивает линейность фазы. Данный класс АЦФ не получил широкого применения на практике в силу сложности адекватного математического описания процессов аналого-цифрового (аналого-дискретного) и цифроаналогового (дискретно-аналогового) преобразования измерительного сигнала в замкнутой структуре. Эти процессы описываются интегрально-разностными уравнениями, для которых нет общих аналитических решений. В отличие от АФ и ЦФ передаточная функция данного класса АЦФ $H(p, e^p)$ имеет двойной аргумент: оператор дифференцирования p и оператор временного сдвига e^p . Передаточная функция $H(p, e^p)$ определяется преобразованием Лапласа импульсной весовой функцией $g(t)$ АЦФ:

$$H(p, e^p) = \mathbf{L}\{g(t)\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{L}\{.\}$ – оператор преобразования Лапласа.

Согласно теории аналитических финитных функций, для данного класса интегрально-разностных уравнений существуют математические условия, при выполнении которых импульсная весовая функция $g(t)$ АЦФ будет финитна и центрально-симметрична [6].

1. Условие финитности импульсной весовой функции $g(t)$ передаточной функцией общего вида $H(p, e^p)$:

– каждому полюсу передаточной функции $H(p)$ сопоставлен ноль передаточной функции $H(e^p)$:

$$H_n(p, e^p) = H(p)H(e^p) = \prod_n \frac{1}{p - p_n} \cdot \prod_n (e^p - e^{p_n}), \quad (2)$$

где p_n – координаты n -го полюса; e^{p_n} – координаты n -го нуля на комплексной плоскости.

2. Условие центральной симметрии импульсной весовой функции $g_n(t)$ АЦФ с передаточной функцией $H_n(p, e^p)$:

– все полюса p_n передаточной функции $H_n(p, e^p)$ дуально симметричны в комплексной плоскости по отношению к мнимой оси координат:

$$p_n^+ = x_n + jy_n; \quad p_n^- = -x_n + jy_n,$$

где x_n, jy_n – числовые значения координат полюсов.

При выполнении этих двух условий передаточная функция общего вида (2) в мультипликативной форме запишется как

$$H_n(p, e^p) = e^{-2np} \prod_n \frac{(e^p - e^{p_n^+})(e^p - e^{p_n^-})}{(p - p_n^+)(p - p_n^-)}. \quad (3)$$

В формулу (3) введен элемент задержки e^{-2np} , поскольку импульсная весовая функция $g_n(t)$ должна начинаться с нулевого момента времени.

Рассмотрим варианты типовых звеньев, входящих в структуру многопетлевых аналого-цифровых фильтров.

Апериодические звенья

Полюса передаточной функции аperiодических звеньев расположены симметрично на действительной оси координат: $p_n^+ = x_n; p_n^- = -x_n$:

$$H_n(p, e^p) = e^{-2np} \prod_n \frac{(e^{2p} - e^p(e^{x_n} + e^{-x_n}) + 1)}{p^2 - x_n^2}. \quad (4)$$

Сделав замену в формуле (4) оператора p на комплексную частоту $j\omega$, получим фазочастотную характеристику аperiодических звеньев в общем виде:

$$H_n(j\omega) = e^{-j2\omega n} \prod_n \frac{(e^{j2\omega} - e^{j\omega}(e^{x_n} + e^{-x_n}) + 1)}{\omega^2 + x_n^2} = e^{-j\omega n} \prod_n \left| \frac{2\cos(\omega) - (e^{x_n} + e^{-x_n})}{\omega^2 + x_n^2} \right|. \quad (5)$$

Колебательные звенья без потерь

Полюса передаточной функции колебательных звеньев без потерь расположены симметрично на мнимой оси координат $p_n^+ = jy_n; p_n^- = -jy_n$:

$$H_n(p, e^p) = e^{-2np} \prod_n \frac{e^{2p} - 2e^p \cos(y) + 1}{p^2 + y_n^2}. \quad (6)$$

Фазочастотная характеристика $H_n(j\omega)$:

$$H_n(j\omega) = e^{-j\omega n} \prod_n \left| \frac{2\cos(\omega) - 2\cos(y)}{y_n^2 - \omega^2} \right|. \quad (7)$$

Интегрирующие звенья

Полюса передаточной функции интегрирующих звеньев расположены на комплексной плоскости в нулевой точке осей координат $p_n = 0$:

$$H_n(p, e^p) = e^{-n} \prod_n \frac{e^p - 1}{p} = \frac{(1 - e^{-1})^n}{p^n}; \quad (8)$$

$$H_n(j\omega) = e^{-j\omega n/2} \left| \frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right|^n. \quad (9)$$

Если спектр входного сигнала ограничен частотой, не превышающей половину частоты дискретизации, то эффектом переноса частот можно пренебречь, что дает возможность оператора аналогового сдвига e^p формально заменить оператором цифрового сдвига z . После этой замены корректна следующая цепочка преобразований:

$$\mathbf{L}\{g(t)\} \Rightarrow H(p, e^p) \Rightarrow H(p, z) \Rightarrow H(p)H(z). \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что передаточную функцию общего вида $H(p, e^p)$ может иметь АЦФ разомкнутого вида с передаточной функцией $H(p, z) = H(p) \cdot H(z)$. Его структура представлена на рис. 1 и состоит из АФ с передаточной функцией $H(p)$, АЦП и ЦФ с передаточной функцией $H(z)$.

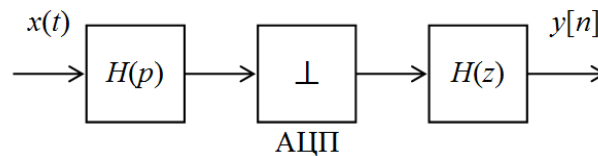


Рис. 1. Структуры АЦФ разомкнутого вида

При выполнении условия (2) импульсная весовая функция АЦФ (рис. 1) будет иметь конечную длительность по времени. Линейность фазочастотной характеристики будет иметь место при выполнении второго условия (3) – полюса передаточной функции $H(p)$ должны быть дуально симметричны в комплексной плоскости по отношению к мнимой оси координат. Из условия симметрии следует, что часть полюсов должна быть расположена в правой полуплоскости или на комплексной оси координат. Но из этого следует, что для части звеньев АЦФ не будут выполняться условия устойчивости. В качестве примера рассмотрим имитационную модель АЦФ интегрирующего дискретизатора (ИД) второго порядка, полюса которого расположены в начале оси координат. Его передаточная функция согласно формуле (8):

$$H_2(p, z) = H(p)H(z) = p^{-2} \cdot (1 - z^{-1})^2. \quad (11)$$

На рис. 2 приведена модель ИД второго порядка, реализованная в системе Matlab Simulink, и временные диаграммы ее работы. Здесь и далее по тексту в моделях, реализованных в системе Matlab Simulink, оператор интегрирования p^{-1} имеет обозначение s^{-1} .

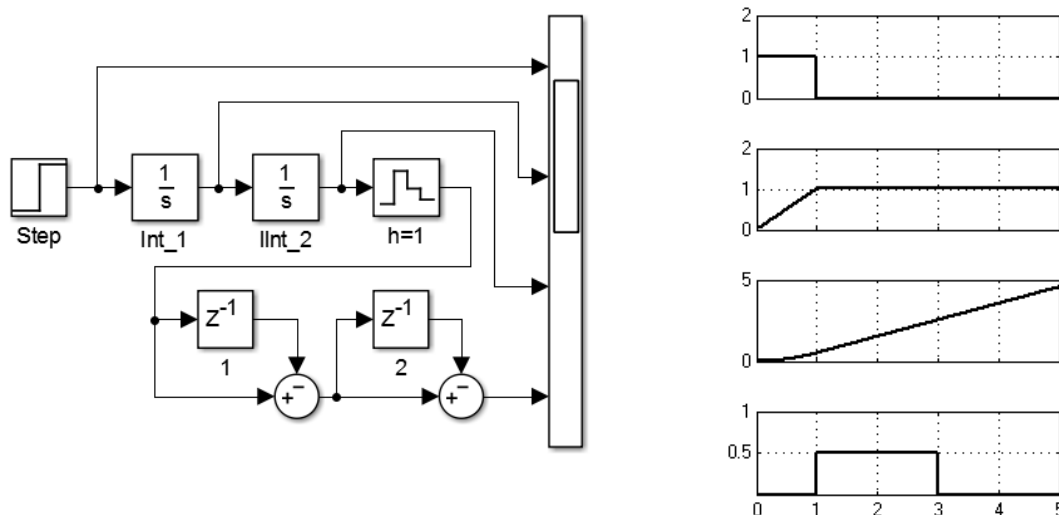


Рис. 2. Модель интегрирующего дискретизатора второго порядка и временные диаграммы его работы

Из временных диаграмм видно, что переходной процесс на выходе ИД конечен и заканчивается за два такта, в то время как выходные сигналы интеграторов имеют неограниченную длительность.

Таким образом, возникает задача обеспечения финитности импульсных весовых функций на уровне элементарных звеньев (в данном примере это интеграторы). Ее решением является переход от АЦФ со структурой разомкнутого вида к АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида. При топологическом преобразовании структуры АЦФ разомкнутого вида к структуре АЦФ замкнутого вида должно выполняться условие, что передаточная функция АЦФ замкнутого вида, пересчитанная к эквивалентному разомкнутому виду, должна совпадать с передаточной функцией исходного АЦФ разомкнутого вида.

Рассмотрим основные этапы проектирования аналого-цифровых фильтров с многопетлевой структурой замкнутого вида с финитной импульсной весовой функцией и линейной фазо-частотной характеристикой.

На первом этапе задается передаточная функция $H(p, z) = H(p) \cdot H(z)$ АЦФ разомкнутого вида (рис.1), которая удовлетворяет заданным системным требованиям по фильтрации измерительных сигналов. На этом этапе выбираются типовые звенья и находятся численные значения полюсов и нулей передаточной функции.

На втором этапе по структуре АЦФ разомкнутого вида строится структура АЦФ замкнутого вида путем введения многопетлевой обратной связи. Модель АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида в минимальном варианте (без ЦФ в прямом канале преобразования и в контуре обратной связи) приведена на рис. 3.

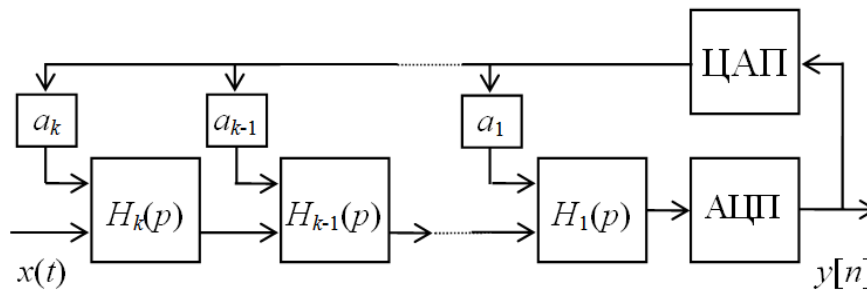


Рис. 3. Модель АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида

Общая передаточная функция общего вида по контуру обратной связи $R_k(p, e^p)$ в аналого-дискретной форме находится как сумма передаточных функций по всем контурам обратной связи. Общим звеном в цепи обратной связи является ЦАП, который формирует ступенчатый аналоговый сигнал обратной связи. Его передаточная функция $D(p, e^p) = (1 - e^{-p})/p$. С учетом этого получаем

$$R_k(p, e^p) = \sum_{i=1}^k \{ a_i \cdot D(p, e^p) \cdot G_i(p) \}, \quad (13)$$

где $G_i(p) = H_1(p) \cdot H_2(p) \cdot \dots \cdot H_i(p)$, $D(p, e^p) = (1 - e^{-p})/p$.

По контуру обратной связи происходит последовательное преобразование сигнала «цифра–аналог–цифра», следовательно, передаточную функцию по контуру обратной связи $R_k(p, e^p)$ необходимо привести к цифровому виду $R_k(z)$. Для этого находим передаточную функцию $R_k(z)$ путем прямого Z преобразования от дискретной импульсной весовой функции $g_k^*[n]$ по каналу обратной связи: $R_k(z) = Z\{g_k^*[n]\}$. Дискретная импульсная весовая функция $g_k^*[n]$ определяется обратным преобразованием Лапласа от $R_k(p, e^p)$: $g_k^*[n] = L^{-1}\{R_k(p, e^p)\}|_{t=n}$. Окончательно получаем

$$R_k(z) = Z\{L^{-1}\{R_k(p, e^p)\}|_{t=n}\}. \quad (14)$$

Для расчета численных значений коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_k$ в модели АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида необходимо, используя правило топологического преобразования замкнутой структуры в эквивалентную разомкнутую структуру, использовать формулу и найти его передаточную функцию $H^*(p, z)$ в соответствии с рис.1:

$$H_k^*(p, z) = \frac{H_k(p)}{1 - R_k(z)} = H_k(p)H^*(z) = H_k(p) \left(\frac{\mu_0 + \mu_1 z^{-1} + \mu_2 z^{-2} + \dots + \mu_k z^{-k}}{1 + \beta_1 z^{-1} + \beta_2 z^{-2} + \dots + \beta_k z^{-k}} \right). \quad (15)$$

Из условия того, что цифровая часть $H^*(z)$ передаточной функции АЦФ не должна содержать полюса, следует, что все коэффициенты β должны быть равны нулю. Это условие позволяет найти численные значения коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_k$ в модели АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида (см. рис. 3). Необходимо составить и решить систему из k уравнений, которые функционально связывают коэффициенты β передаточной функции $H^*(p, z)$ с коэффициентами $a_1, a_2, \dots, a_k$ модели АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида рис. 3.

Рассмотрим пример расчета АЦФ с многопетлевой структурой замкнутого вида относящегося к классу интегрирующих дискретизаторов с передаточной функцией (8).

Ниже, в табл. 1, приведены формулы передаточных функций по контуру обратной связи $R_k(z)$, полученные по формуле (14) до четвертого порядка ($k = 1, 2, \dots, 4$). Для более компактной записи формулы передаточных функций $R_k(z)$ приведены в рекурсивном виде.

Таблица 1

Передаточная функции контура обратной связи общего вида $R_k(p, e^p)$
и ее эквивалентная цифровая форма $R_k(z)$

k	$R_k(p, e^p)$	$R_k(z)$
1	$\left(\frac{1-e^{-1}}{p} \right) \frac{a_1}{p}$	$R_1(z) = \frac{a_1 z^{-1}}{(1-z^{-1})}$
2	$\left(\frac{1-e^{-1}}{p} \right) \left\{ \frac{a_2}{p^2} + \frac{a_1}{p} \right\}$	$R_2(z) = \frac{a_2 z^{-1}(1+z^{-1})}{2!(1-z^{-1})^2} + R_1$
3	$\left(\frac{1-e^{-1}}{p} \right) \left\{ \frac{a_3}{p^3} + \frac{a_2}{p^2} + \frac{a_1}{p} \right\}$	$R_3(z) = \frac{a_3 z^{-1}(1+4z^{-1}+z^{-2})}{3!(1-z^{-1})^3} + R_2$
4	$\left(\frac{1-e^{-1}}{p} \right) \left\{ \frac{a_4}{p^4} + \frac{a_3}{p^3} + \frac{a_2}{p^2} + \frac{a_1}{p} \right\}$	$R_4(z) = \frac{a_4 z^{-1}(1+11z^{-1}+11z^{-2}+z^{-3})}{4!(1-z^{-1})^4} + R_3$

На следующем шаге после подстановки $R_k(z)$ в формулу (15) рассчитывается передаточная функция $H_k^*(z)$, находятся функции $\beta(a_1, \dots, a_k) = c_0 + c_1 a_1 + \dots + c_k a_k$ в виде систем из k уравнений и их решения из условия $\beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$ (табл. 2).

Таблица 2

Системы k уравнений $\beta(a_1, \dots, a_k) = c_0 + c_1 a_1 + \dots + c_k a_k$ и их решения из условия $\beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$

k	$\beta(a_1, \dots, a_k) = c_0 + c_1 a_1 + \dots + c_k a_k$	$a_1, a_2, \dots, a_k$ $\beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$
1	$\{\beta_1 = 1 + a_1\}$	$\{a_1 = -1\}$
2	$\begin{cases} \beta_1 = -2 - (1/2)a_2 - a_1 \\ \beta_2 = 1 - (1/2)a_2 + a_1 \end{cases}$	$\begin{cases} a_1 = -3/2 \\ a_2 = -1 \end{cases}$
3	$\begin{cases} \beta_1 = -3 - (1/6)a_3 - (3/6)a_2 - a_1 \\ \beta_2 = 3 - (4/6)a_3 - 2a_1 \\ \beta_3 = -1 - (1/6)a_3 + (3/6)a_2 - a_1 \end{cases}$	$\begin{cases} a_1 = -11/6 \\ a_2 = -12/6 \\ a_3 = -1 \end{cases}$
4	$\begin{cases} \beta_1 = -4 - (1/24)a_4 - (4/24)a_3 - (12/24)a_2 - a_1 \\ \beta_2 = 6 - (11/24)a_4 - (12/24)a_3 + (12/24)a_2 + a_1 \\ \beta_3 = -4 - (11/24)a_4 - (12/24)a_3 + (12/24)a_2 - 3a_1 \\ \beta_4 = 1 - (1/24)a_4 + (4/24)a_3 - (12/24)a_2 + a_1 \end{cases}$	$\begin{cases} a_1 = -25/12 \\ a_2 = -35/12 \\ a_3 = -30/12 \\ a_4 = -1 \end{cases}$

В качестве примера моделирования на рис. 4 приведена модель ИД замкнутой многопетлевой структуры ИД второго порядка и временные диаграммы ее работы. Значения коэффициентов a_1 и a_2 взяты из табл. 2.

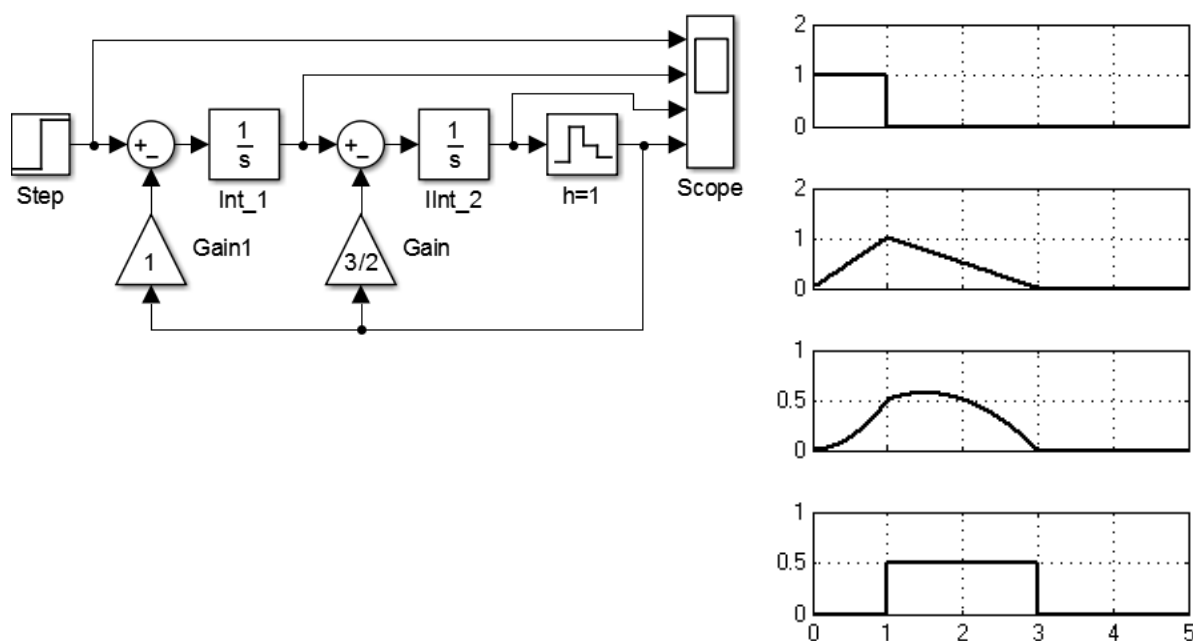


Рис. 4. Модель ИД замкнутой многопетлевой структуры второго порядка и временные диаграммы ее работы

Из сопоставления временных диаграмм рис. 2 и 4 очевидно, что, сохраняя свойство финитности и симметрии импульсной весовой функции «вход-выход», в варианте ИД с замкнутой многопетлевой структурой выходной сигнал каждого звена интегрирования финитен и заканчивается за два такта преобразования.

Описанные выше этапы проектирования и основные математические формулы, положенные в основу метода синтеза аналого-цифровых фильтров замкнутого вида с линейной фазой и финитной импульсной весовой функцией, носят достаточно общий характер. Они могут быть использованы в качестве дополнения к существующим алгоритмам автоматизированного проектирования аналоговых и цифровых фильтров на базе современных программируемых аналого-цифровых интегральных схем, которые имеют в своем составе весь набор аналого-цифровых элементов и элементов программного управления, необходимых для реализации сложных аналого-цифровых фильтров со структурой замкнутого вида [7]. Это дает возможность широкого применения данного класса АЦФ в современных многоканальных информационно-измерительных системах.

Список литературы

1. Козырев Г. И., Кравцов А. Н., Усиков В. Д. Расчет частоты опроса в многоканальных информационно-измерительных системах с единых энергетических и точностных позиций // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 14–21.
2. Турулин И. И. Основы теории КИХ-фильтров. Таганрог : Изд-во Южного федер. ун-та, 2016. 264 с.
3. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры : пер. с англ. / под ред. В. Л. Левина, М. Н. Микшиса, И. Н. Теплоука. М. : Мир, 1982. 594 с.
4. Гребенко Ю. А., Поляк Р. И., Стариковский А. И., Куликов Г. В. Цифровые методы линеаризации фазочастотных характеристик аналоговых фильтров // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, № 2. С. 144–151.
5. Грибань М. Е., Адаев Н. В. Синтез замкнутых структур непрерывно-дискретных преобразователей сигналов сложной формы // Современные информационные технологии. 2007. № 5. С. 77–85.
6. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Прогресс в Советском Союзе в области теории финитных функций и ее применений в физике и технике // Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1977. Т. 65, № 7. С. 16–45.

7. Строгонов А. В., Быстрицкий А. Д. Проектирование КИХ-фильтров с учетом архитектурных особенностей ПЛИС // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 122–127.

References

1. Kozyrev G.I., Kravtsov A.N., Usikov V.D. Calculation of the polling frequency in multichannel information and measurement systems from unified energy and precision positions. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):14–21. (In Russ.)
2. Turulin I.I. *Osnovy teorii KIKh-fil'trov = Fundamentals of the theory of FIR filters.* Taganrog: Izd-vo Yu-zhnogo feder. un-ta, 2016:264. (In Russ.)
3. Lem G. *Analogovye i tsifrovye fil'try: per. s angl. = Analog and digital filters : translated from English.* Moscow: Mir, 1982:594. (In Russ.)
4. Grebenko Yu.A., Polyak R.I., Starikovskiy A.I., Kulikov G.V. Digital methods of linearization of phase-frequency characteristics of analog filters. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and Electronics.* 2019;64(2):144–151. (In Russ.)
5. Griban' M.E., Adaev N.V. Synthesis of closed structures of continuously discrete converters of complex shape signals. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies.* 2007;(5):77–85. (In Russ.)
6. Khurgin Ya.I., Yakovlev V.P. Progress in the Soviet Union in the field of the theory of finite functions and its applications in physics and technology. *Trudy Instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike = Proceedings of the Institute of Electrical and Radio Electronics Engineers.* 1977;65(7):16–45. (In Russ.)
7. Strogonov A.V., Bystritskiy A.D. Design of key filters taking into account the architectural features of FPGAs. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies.* 2014;(8):122–127. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Викторович Чувькин

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

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)

Ирина Анатольевна Долгова

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

Irina A. Dolgova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of information and computing 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 20.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 18.03.2024

Принята к публикации / Accepted 12.04.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.783.25

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНОГО ДАТЧИКА В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НАВИГАЦИИ

М. М. Морозов¹, А. А. Трофимов², И. Н. Урваев³, К. Д. Целикин⁴, О. Н. Бодин⁵

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

⁵ Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹mmorozov1295@mail.ru, ²alex.t1978@mail.ru, ³iurvaev@mail.ru, ⁴kdts777@yandex.ru, ⁵bodin_o@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Системы навигации реализуются с помощью спутникового позиционирования, однако спутниковое позиционирование не может передавать информацию об окружающих объектах. *Материалы и методы.* Для определения местоположения объектов, располагающихся вокруг транспортного средства, необходимо использовать персональные системы позиционирования. Предлагается реализация таких систем с помощью гибридного датчика расстояния, представляющего собой интеграцию монокулярной видеокамеры и 2D-лазерного дальномера, что позволяет оценить окружающую транспортное средство обстановку. *Результаты и выводы.* Отличительной особенностью разработки гибридного датчика расстояния является применение калибровочного стенда, существенно повышающего тактико-технические характеристики гибридного датчика.

Ключевые слова: гибридный датчик расстояния, система навигации, калибровочный стенд, калибровка лазера и видеокамеры, имитационное моделирование

Для цитирования: Морозов М. М., Трофимов А. А., Урваев И. Н., Целикин К. Д., Бодин О. Н. Особенности разработки гибридного датчика в инерциальной системе навигации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 40–50. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF A HYBRID SENSOR IN AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

M.M. Morozov¹, A.A. Trofimov², I.N. Urvaev³, K.D. Celikin⁴, O.N. Bodin⁵

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

⁵ Penza State Technological University, Penza, Russia

¹mmorozov1295@mail.ru, ²alex.t1978@mail.ru, ³iurvaev@mail.ru, ⁴kdts777@yandex.ru, ⁵bodin_o@inbox.ru

Abstract. *Background.* Navigation systems are implemented using satellite positioning, but satellite positioning cannot transmit information about surrounding objects. *Materials and methods.* To determine the location of objects located around the vehicle, it is necessary to use personal positioning systems. It is proposed to implement such systems using

a hybrid distance sensor, which is an integration of a monocular video camera and a 2D laser rangefinder, which allows you to assess the environment of the vehicle. *Results and conclusions.* A distinctive feature of the development of the hybrid distance sensor is the use of a calibration stand, which significantly increases the tactical and technical characteristics of the hybrid sensor.

Keywords: hybrid distance sensor, navigation system, calibration stand, laser and video camera calibration, simulation modeling

For citation: Morozov M.M., Trofimov A.A., Urvaev I.N., Celikin K.D., Bodin O.N. Features of the development of a hybrid sensor in an inertial navigation system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):40–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-5

Введение

В настоящее время беспилотные транспортные средства (БТС) применяют спутниковые системы навигации, которые обеспечивают определение абсолютного положения и помогают инерциальной навигационной системе [1]. Однако такого типа навигационной системы недостаточно, поскольку БТС должно иметь возможность определять свое положение в зонах, где нет доступа спутниковой навигации. Например, городские кварталы, подземные туннели и паркинги, пересеченная местность (овраги, горы, реки и т.д.) создают помехи, которые являются причинами низкой точности позиционирования систем спутниковой навигации. Поэтому актуальна задача разработки других типов датчиков, дополнительно предоставляющих точную информацию об окружающих БТС объектах. Оснащение БТС дополнительными датчиками, способными передавать информацию об окружающих объектах, позволяет осуществлять автономные передвижения в пространстве без участия человека [1]. Данные типы датчиков не предоставляют информацию об абсолютном местоположении БТС, но повышают надежность и точность инерциальной навигационной системы за счет определения расстояния до окружающих объектов. Широко используемый метод визуальной одометрии предлагает подходы к решению этой задачи. Например, можно использовать две видеокамеры [2]. Они позволяют определить размер объекта с помощью метода триангуляции [3]. Другим решением являются лазерные дальномеры, которые предоставляют точную информацию о расстоянии без триангуляции [4]. Лазерные дальномеры рассчитаны, в основном, на структурированную среду, например стены в помещении. Авторы предлагают объединить оба известных метода позиционирования для получения точной информации об окружающих объектах БТС на открытой местности. При таком синергетическом объединении методов позиционирования необходима точная информация о взаимоположении составных элементов гибридного датчика – камеры и лазера, что в свою очередь требует внешнюю калибровку.

Целью данной работы является разработки гибридного датчика расстояния в структуре бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), установленного на беспилотном транспортном средстве.

Структура бесплатформенной инерциальной навигационной системы

В данной работе рассматривается гибридный датчик расстояния для навигационного обеспечения БТС. Навигационное обеспечение БТС может быть обеспечено с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы [11]. Однако продолжительное использование БИНС сопровождается увеличением значения погрешностей при определении координат. Поэтому для коррекции в процессе эксплуатации параметров БИНС необходимо, по мнению авторов, применять гибридный датчик расстояния на основе лазера и видеокамеры. Структура БИНС с коррекцией параметров на основе гибридного датчика расстояния приведена на рис. 1.

Кратко опишем работу предлагаемой структуры БИНС. Данные об угловой скорости и ориентации поступают с трехосевого гироскопа, а данные о линейном ускорении поступают с трехосевого акселерометра, после чего они обрабатываются в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Последовательность обработки данных в ПЛИС приведена на рис. 2.

Для правильного функционирования БИНС необходимо задать начальные условия. Flash-память предназначена для загрузки файла конфигурации ПЛИС. Гибридный датчик расстояния на основе лазера и видеокамеры предназначен для коррекции данных, поступающих с гироскопа и акселерометра. В результате обработки данных, производимых в ПЛИС, на выходе БИНС формируются данные о положении беспилотного транспортного средства.

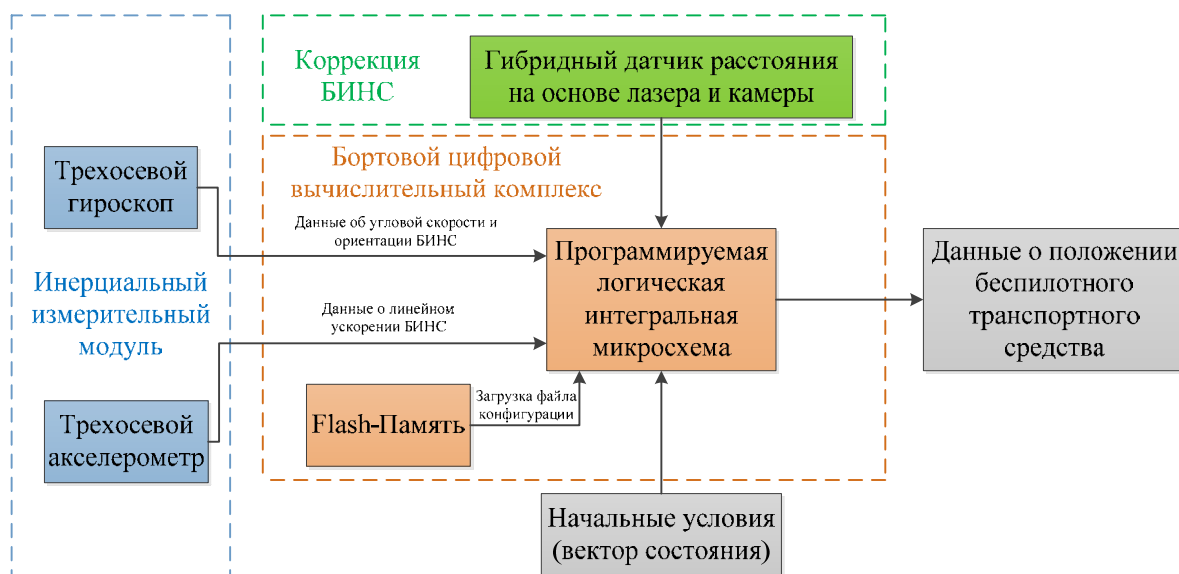


Рис. 1. Структура бесплатформенной инерциальной навигационной системы

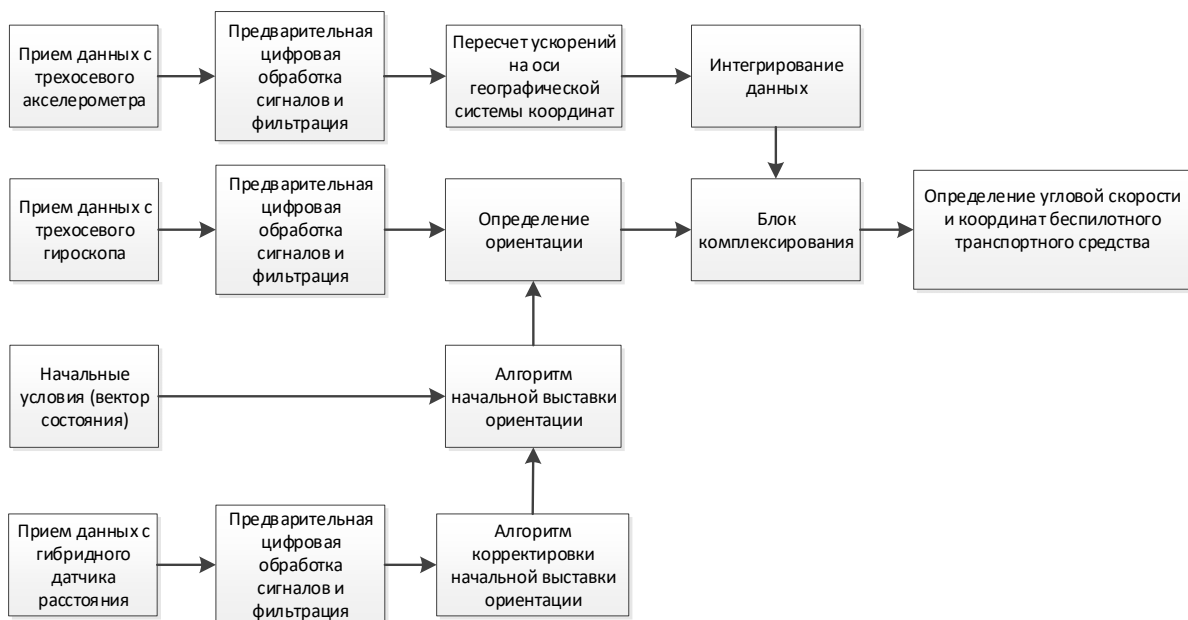


Рис. 2. Последовательность обработки данных в ПЛИС

Метод калибровки гибридного датчика расстояния

В данном разделе статьи подробно рассмотрим метод калибровки гибридного датчика расстояния. Пространственная система координат гибридного датчика расстояния задается следующим образом: начало координат находится в центре корпуса датчика; ось X направлена вперед; ось Y направлена вправо; ось Z направлена вниз.

Для объединения в единое целое оба взаимодополняющих устройства, а именно монокулярную видеокамеру и лазерный 2D-дальномер, важно иметь их «жесткую привязку» друг к другу. Для этого точка лазерного луча на объекте должна быть присвоена пикселям изображения видеокамеры.

Калибровка видеокамеры и лазерного дальномера осуществляется с помощью калибровочного стенда, 3D-модель которого и ее схематическое изображение приведены на рис. 3, а и б соответственно.

Калибровочный стенд состоит из двух параллельных плоскостей (представлены на рис. 3 серым и оранжевым цветами). Каждый цвет на рис. 3 показывает свою плоскость лазерного сканирования с собственным углом наклона в пространстве. Оранжевая плоскость расположена на заднем плане и представляет собой прямоугольный треугольник, а серая плоскость

располагается на переднем плане (рис. 3,б). На серой плоскости по углам закреплены калибровочные кольца.

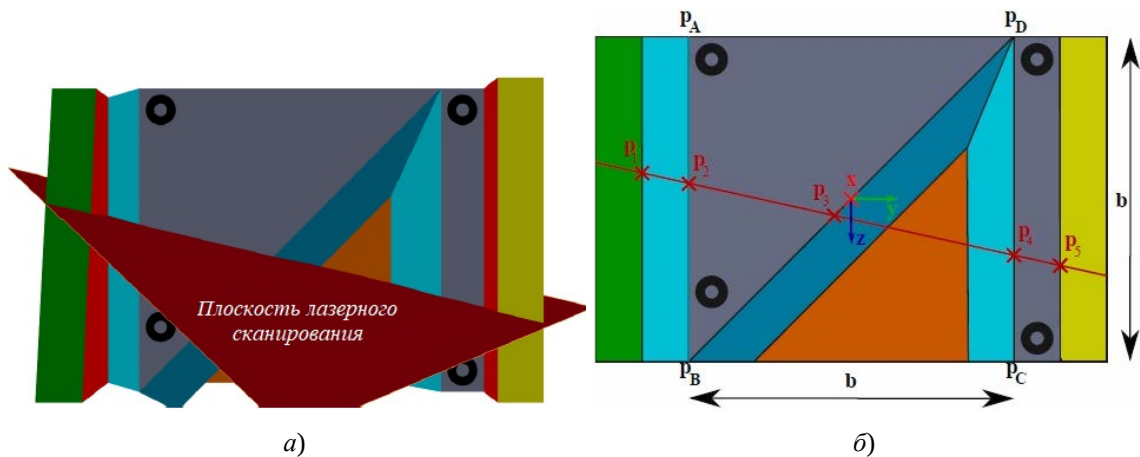


Рис. 3. 3D-модель калибровочного стенда (а) и ее схематическое изображение (б)

Калибровка видеокамеры и лазерного дальномера осуществляется следующим образом: с помощью видеокамеры обнаруживают калибровочные круглые кольца. Затем сканируют калибровочный объект лазером, в результате плоскость лазерного сканирования пересекается с калибровочным объектом по прямой линии от точки p_1 до точки p_5 (рис. 3,б). При этом возникают разрывы глубины, поскольку при наведении лазера на рифленые поверхности луч рассеивается. В частности, точки от p_1 до p_5 , расположенные на рис. 3,б, не распознаны видеокамерой.

Для устранения возникших разрывов глубины используются калибровочные круглые кольца, которые позволяют восстановить точки на изображении.

Можно получить соответствия между лазерными точками на объекте и точками, полученными на изображении видеокамеры.

Положительный результат калибровки достигается, когда поле зрения камеры включает все четыре круговых кольца, а плоскость лазерного сканирования включает как минимум точки от p_2 до p_4 (рис. 3,б).

В качестве метода калибровки было выбрано адаптивное извлечение линий [5]. При наличии шума этот метод показывает надежную работу в отношении проблемы ложного разрыва истинных сегментов линий [6]. Лазерные точки на калибровочном объекте принадлежат сегментам линий, конечные точки которых включают точки от p_2 до p_4 . Следовательно, соответствующие точки, полученные с помощью видеокамеры, определяются со всеми лазерными точками, которые соответствуют отдельным сегментам линии на калибровочном стенде.

После обнаружения точек p_2 – p_4 лазера на стенде необходимо восстановить данные точки на изображении, которое получено с помощью видеокамеры. Для этого сначала точки описываются в координатах объекта путем простых геометрических вычислений. Затем точки определяются в координатах изображения с помощью калибровочных круглых колец. Точку геометрического расчета p_3 можно вычислить по теореме о пересечении [4]. Точка пересечения p_3 обусловлена линиями (p_B, p_D) и (p_2, p_4) , проходящими через точки p_B, p_D и точки p_2, p_4 соответственно. Расстояния p_{23} , p_{34} задаются выделенными лазерными характерными точками и определяются по формуле

$$p_{ij} := p_i^l - p_j^l = p_i^c - p_j^c. \quad (1)$$

Длина диагонали между точками p_B и p_D равна $\sqrt{b^2 + b^2} = \sqrt{2}b$. Таким образом, отмеченное расстояние от точки p_B до точки p_3 на рис. 3,б можно рассчитать по формуле

$$p_{B3} = \frac{p_{23}\sqrt{2}b}{p_{23} + p_{34}}. \quad (2)$$

На рис. 4 приведены соответствующие сегменты для определения точек в координатах объекта калибровки.

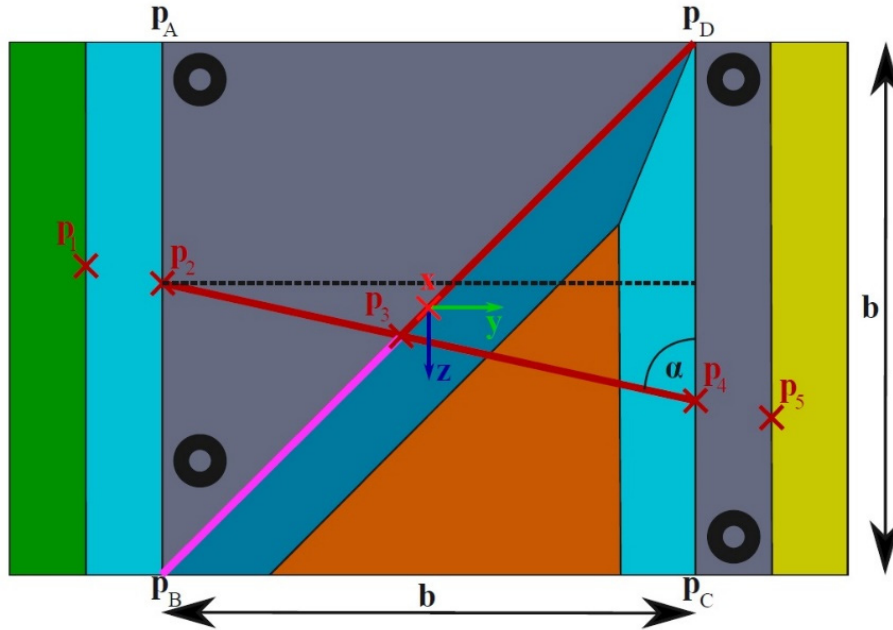


Рис. 4. Соответствующие сегменты для определения точек в координатах объекта калибровки

Из уравнения (2) определяются координаты точки p_3 в координатах калибровочного стенда следующим образом:

$$p_3^o = \begin{pmatrix} p_{3,x}^o \\ p_{3,y}^o \\ p_{3,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{p_{B3}}{\sqrt{2}} - \frac{b}{2} \\ -\frac{p_{B3}}{\sqrt{2}} + \frac{b}{2} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Вычисление p_2 и p_4 в координатах объекта производится с помощью теоремы косинусов [7]:

$$p_{B2} = \sqrt{p_{B3}^2 + p_{23}^2 - 2p_{B3}p_{23}\cos\left(\pi - \frac{\pi}{4} - \alpha\right)};$$

$$p_{B4} = \sqrt{\left(\sqrt{2}b - p_{B3}\right)^2 + p_{34}^2 - 2\left(\sqrt{2}b - p_{B3}\right)p_{34}\cos\left(\pi - \frac{\pi}{4} - \alpha\right)}. \quad (4)$$

Затем определяется угол α , показанный на рис. 4:

$$\alpha = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{b}{p_{24}}\right), \\ \pi - \arcsin\left(\frac{b}{p_{24}}\right). \end{cases} \quad (5)$$

По формуле (4) определяются координаты точек p_2^o :

$$p_2^o = \begin{pmatrix} p_{2,x}^o \\ p_{2,y}^o \\ p_{2,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{b}{2} \\ \frac{b}{2} - p_{B2} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$p_2^o = \begin{pmatrix} p_{4,x}^o \\ p_{4,y}^o \\ p_{4,z}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ b - \frac{b}{2} \\ -\left(b - p_{D4} - \frac{b}{2}\right) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

После определения точек p_i^o в координатах стенда они проецируются на изображение, полученное с помощью видеокамеры. Для проецирования произвольной точки серой плоскости калибровки ($p_{i,x}^o = 0$) на плоскость изображения накладывается матрица преобразования H . Эта матрица отображает данные точки на координатах изображения следующим образом:

$$H \begin{pmatrix} p_{i,y}^o \\ p_{i,z}^o \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для наложения матрицы необходимо не менее четырех точек на плоскости. Это возможно с помощью круглых колец, поскольку положения их центров известны в координатах объекта и находятся в координатах изображения, полученного с помощью видеокамеры. Для этого на бинарном изображении обнаруживают контуры объектов и выделяются эллиптические формы. Полученные точки можно представить как

$$f_i^c = \frac{K^{-1}(u_i \quad v_i \quad 1)^T}{K^{-1}(u_i \quad v_i \quad 1)} = \frac{p_i^c}{p_i^c}, \quad (9)$$

где K – внутренняя матрица камеры; u_i и v_i – двумерные точки, записанные в виде единичных векторов.

Благодаря тому, что внешний и внутренний контуры кольца имеют одинаковые соотношения расстояний между большой и малой осями, повышается точность обнаружения кругового маркера.

Результаты и обсуждение

Авторами проведено моделирование предложенного метода калибровки. Сравнение двух показаний дальности лазера, полученных с помощью исходного [4] и модифицированного калибровочного стенда, показано на рис. 5.

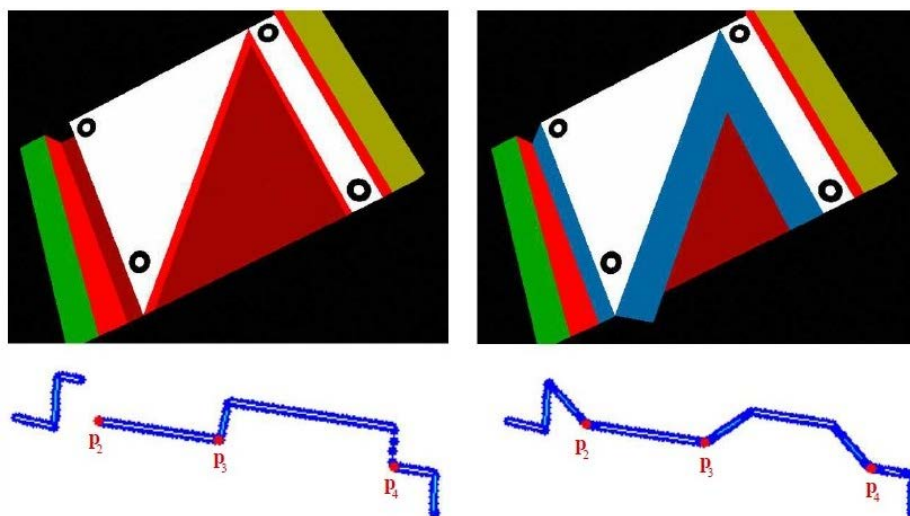


Рис. 5. Сравнение показаний лазерной глубины между оригиналом (слева) и модифицированным калибровочным стендом (справа)

Из рис. 5 видно, что все соответствующие сегменты линий видны на изображении, полученном видеокамерой с разных точек обзора, что позволяет добиться точного определения положения точки лазера на объекте.

Разработанная 3D-модель объекта калибровки визуализирована с помощью программной среды MatLab Simulink. В результате моделирования для видеокамеры выделены области калибровки площадью $0,01 \text{ м}^2$, в которых видеокамера определяла точки, излучаемые лазером. Таким образом, получены данные о положении гибридного датчика расстояния относительно стенда. Визуальное представление сгенерированных точек лазера на стенде представлено на рис. 6.

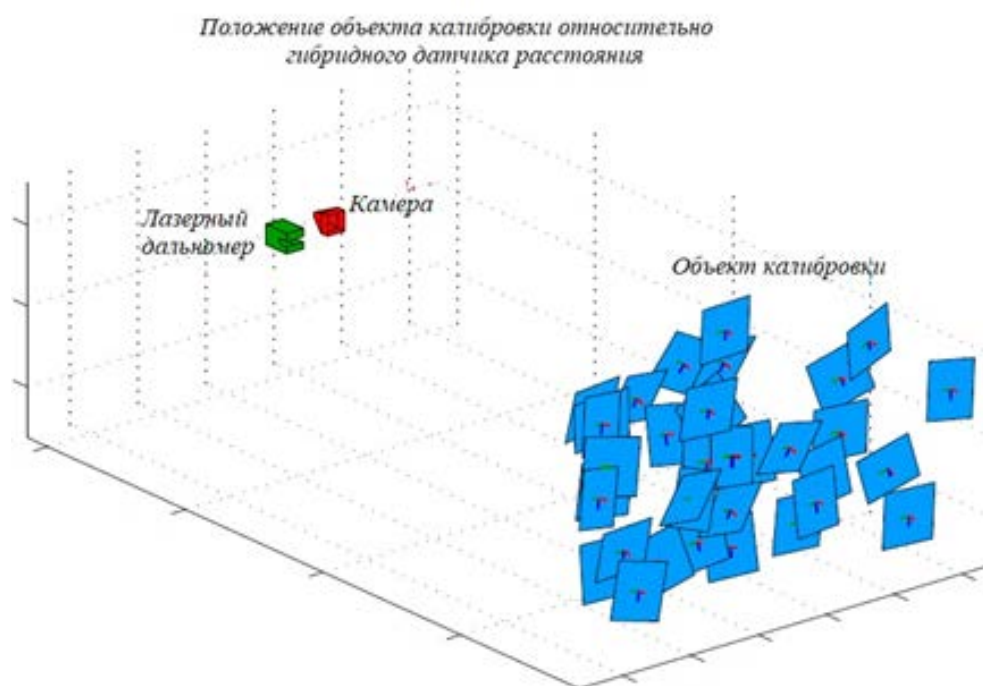


Рис. 6. Визуальное представление сгенерированных положений точек лазерного луча

Моделирование каждой позиции лазерной точки на стенде производилось 100 раз, после чего распознанные точки лазера, которые выходили за область калибровки, отсеивались, вследствие чего область определения видеокамерой лазерной точки уменьшалась. Таким образом, получена диаграмма, показывающая отношение выявленных точек к отсеянным. Данная диаграмма представлена на рис. 7.

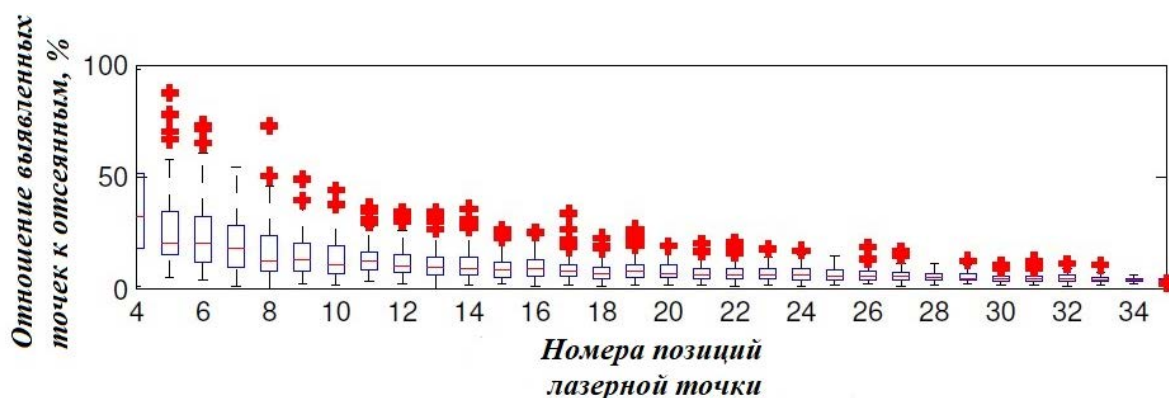


Рис. 7. Диаграмма выявленных точек лазера

Крестами обозначены отсеянные лазерные точки, которые не попали в калибровочную область. Горизонтальные линии представляют процентное соотношение выявленных точек лазера, которые попали в калибровочную область к точкам, которые были отсеяны; данное отношение описывается следующей формулой:

$$\delta_t = \frac{\|\Delta t_{lc}^l\|}{\|\bar{t}_{lc}^l\|} = \frac{\|\hat{t}_{lc}^l - \bar{t}_{lc}^l\|}{\|\bar{t}_{lc}^l\|}. \quad (10)$$

Очевидно, что область калибровки уменьшается при увеличении калибровочных позиций лазерных точек на калибровочном стенде. Используя все калибровочные позиции лазерных точек на калибровочном стенде, можно достичь средней ошибки смещения лазерной точки, выявленной камерой, относительно их положения на стенде 2,49 %.

Для сравнения, в исходном методе и с немодифицированным стендом (рис. 5 слева), предложенным Хоангом и другими в работе [4], относительная ошибка смещения лазерной точки из калибровочной области составляет 4,28 %.

В ходе калибровки все проекции лазерных точек выявляются видеокамерой. Конечные точки лазерных линий выравниваются по краям объектов, в этом случае видеокамера обнаруживает также длины волн ближнего инфракрасного диапазона. В табл. 1 показано, что с помощью уменьшения Δp_{23} можно снизить погрешность.

Таблица 1

Результаты сравнения ошибки расстояния Δp_{23} и результирующей ошибки Δp_{B3}

Ошибка объекта калибровки	Δp_{23}	Δp_{B3}
Ошибка калибровочного стенда [5], м	–0,062	–0,086
Ошибка модифицированного калибровочного стенда, м	0,024	0,035

Таким образом, с помощью предложенного метода калибровки удалось повысить тактико-технические характеристики гибридного датчика расстояния, что, в свою очередь, позволяет с большей достоверностью корректировать показания БИНС.

Заключение

В статье предложен гибридный датчик расстояния, встроенный в БИНС и реализованный на основе видеокамеры и 2D-лазера, вращающегося вокруг своей оси. В результате модификации калибровочного стенда разработан метод калибровки предложенного гибридного датчика расстояния. Применение этого метода калибровки позволяет повысить точностные показатели датчика и снижает среднюю ошибку смещения до 2,49 %. Гибридный датчик расстояния может быть использован для ориентации в неструктурированных областях открытой местности, где спутниковая система навигации недоступна или не применима. Накопив данные лазерного сканирования, можно создать объемную модель окружающего пространства. В этом случае необходимо использовать второй гибридный датчик расстояния, установленный вертикально с вращающейся площадкой.

Список литературы

1. Чикрин Д. Е., Савинков П. А., Кокунин П. А., Шагиев Р. И. Разработка высокоточной спутниковой локально-инерциальной системы навигации для беспилотного управления транспортными средствами // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1094–1102.
2. Schmid K., Lutz P., Tomić T. [et al.]. Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation // J. Field Robot. 2014. Vol. 31. P. 537–570.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [Tutorial] // IEEE Robot. Autom. Mag. 2011. № 18. P. 80–92.
4. Hoang V. D., Hernández D. C., Jo K. H. Simple and efficient method for calibration of a camera and 2D laser rangefinder // Intelligent Information and Database Systems. Springer : Cham, Switzerland, 2014. P. 561–570.
5. Yaghobi M., Jadalila M., Zolghadr J., Norouzi M. Adaptive line extraction algorithm for SLAM application // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008) (Bangkok, Thailand, 22–25 February 2009). Bangkok, 2009. P. 1850–1855.
6. Crocoll P. Modellbasierte Quadropteron-Navigation mit Laserstützung : Ph.D. Thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, Germany, 2015.
7. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М. : Машиностроение, 1982.

8. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Патрикеев А. П. [и др.]. Объектно-ориентированная технология интеграции навигационных измерителей и ее реализация в бесплатформенной инерциальной навигационной системе БИНС-1000 на волоконно-оптических гироскопах // Доклады XVI Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 25–27 мая 2009 г.). СПб., 2009. С. 21–30.
9. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е. [и др.]. Исследование работы БИНС в условиях высоких широт с учетом погрешностей реальных датчиков // Доклады XVI Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 25–27 мая 2009 г.). СПб., 2009. С. 57–60.
10. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
11. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Кировоград : Полимед-Сервис, 2011.
12. Соколов С. В., Погорелов В. А. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М. : Физматлит, 2009.
13. Халютин С. П., Жмуров Б. В. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 425–429.
14. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П. Разработка программно-математического обеспечения инерциально-спутниковой навигационной системы на базе трехкомпонентного лазерного моноблока // XX Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб. : Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», 2013. С. 173–176.
15. Евдокимов А. О., Зуев А. В., Кислицын А. А. Комплексирование алгоритмов обработки радионавигационных данных и анализа изображений для корректировки маршрута движения наземного транспортного средства // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 2. С. 61–72.

References

1. Chikrin D.E., Savinkov P.A., Kokunin P.A., Shagiev R.I. Development of a high-precision satellite locally inertial navigation system for unmanned vehicle control. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = News of universities. Instrumentation*. 2020;63(12):1094–1102. (In Russ.)
2. Schmid K., Lutz P., Tomić T. et al. Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation. *J. Field Robot.* 2014;31:537–570.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [Tutorial]. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2011;(18):80–92.
4. Hoang V.D., Hernández D.C., Jo K.H. Simple and efficient method for calibration of a camera and 2D laser rangefinder. *Intelligent Information and Database Systems*. Springer: Cham, Switzerland, 2014:561–570.
5. Yaghobi M., Jadaliha M., Zolghadr J., Norouzi M. Adaptive line extraction algorithm for SLAM application. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008) (Bangkok, Thailand, 22–25 February 2009)*. Bangkok, 2009:1850–1855.
6. Crocoll P. *Modellbasierte Quadropter-Navigation mit Laserstützung*: Ph.D. Thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Karlsruhe, Germany, 2015.
7. Kuzovkov N.T., Salychev O.S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya fil'tratsiya = Inertial navigation and optimal filtration*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. (In Russ.)
8. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Patrikeev A.P. i dr. Object-oriented technology of integration of navigation meters and its implementation in the free-form inertial navigation system BINS-1000 on fiber-optic gyroscopes. *Doklady XVI Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam (g. Sankt-Peterburg, 25–27 maya 2009 g.) = Reports of the XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (St. Petersburg, May 25-27, 2009)*. Saint Petersburg, 2009:21–30. (In Russ.)
9. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Prilutskiy V.E. et al. Investigation of the operation of BINS in high latitude conditions, taking into account the errors of real sensors. *Doklady XVI Sankt-Peterburgskoy Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam (g. Sankt-Peterburg, 25–27 maya 2009 g.) = Reports of the XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (St. Petersburg, May 25-27, 2009)*. Saint Petersburg, 2009:57–60. (In Russ.)
10. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh system = Fundamentals of building free-form inertial navigation systems*. Saint Petersburg: TsNII «Elektro-pribor», 2009. (In Russ.)
11. Meleshko V.V., Nesterenko O.I. *Besplatformennye inertsial'nye navigatsionnye sistemy = Free-form inertial navigation systems*. Kirovograd: Polimed-Servis, 2011. (In Russ.)
12. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. *Osnovy sinteza mnogostrukturnykh besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh system = Fundamentals of synthesis of multistructural free-form inertial navigation systems*. Moscow: Fizmatlit, 2009. (In Russ.)

13. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V. Algorithm for determining the composition and parameters of primary UAV power sources. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;1:425–429. (In Russ.)
14. Chernodarov A.V., Patrikeev A.P. Development of software and mathematical support for an inertial satellite navigation system based on a three-component laser monoblock. *XX Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam = XX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg: Kontsern «TsNII "Elektropribor"», 2013:173–176. (In Russ.)
15. Evdokimov A.O., Zuev A.V., Kislytsyn A.A. Integration of algorithms for processing radio navigation data and image analysis for correcting the route of a ground vehicle. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Radio engineering and infocommunication systems*. 2013;(2):61–72. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Михайлович Морозов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mmorozov1295@mail.ru

Mikhail M. Morozov

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

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Alexei A. Trofimov

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

Илья Николаевич Урваев

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

Ilya N. Urvaev

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

Кирилл Дмитриевич Целикин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kdts777@yandex.ru

Kirill D. Celikin

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

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
профессор кафедры технического управления качеством,
Пензенский государственный технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information-measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
professor of the sub-department of technical quality management,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukova passage/Gagarina street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 11.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.04.2024

Принята к публикации/Accepted 13.05.2024

УДК 67.02.681
doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕНСОРНЫХ И АКТЮАТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Трофимов¹, С. А. Здобнов², С. О. Забродин³, Е. А. Фокина⁴

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

¹ alex.t1978@mail.ru, ² sa_zdobnov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ekaterina.isay1997@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* На сегодняшний день в России отсутствуют научно-технический и экспериментально-технологический заделы по разработке систем структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта, необходимые для полной оценки надежности технически сложных объектов неразрушающими методами. Разработка аэрокосмических структур последнего поколения требует создания новейших материалов, которые имели бы высокие физические и механические параметры, отвечали бы требованиям по надежности и ресурсу прочности для решения специфических задач. Большое значение отводится также активным материалам и структурам, способным формировать функциональные формы и профили в зависимости от внешнего воздействия, т.е. обеспечивать выполнение одного из принципов концепции управления перемещением – адаптроники. Формирование функциональных форм и профилей позволит обеспечивать оптимальный аэродинамический профиль крыла, лучшую маневренность летательного аппарата, снизить потребление топлива, энергии и обеспечить лучший дистанционный контроль в экстремальных условиях космоса. Целью данной статьи является создание научно-технического и экспериментально-технологического задела по разработке перспективных технологий изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезокерамических материалов и технологий встраивания в элементы композитных конструкций изделий РКТ и НКИ с целью контроля и управления их характеристиками для предупреждения возникновения аварийных ситуаций. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура системы структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов РКТ и НКИ с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта. *Результаты.* В результате реализации технологии будут созданы импортонезависимые саморегулируемые адаптивные структуры конструкций и оборудования космических аппаратов на основе управляемых свойств материалов с реакцией на внешние воздействия. Внедрение технологии позволит создать эффективную систему управления колебаниями элементов конструкции. Разработанные пьезоактюаторы найдут применения в системах структурного мониторинга авиакосмической промышленности в ракетно-космических технологиях и машиностроении.

Ключевые слова: математическая модель, структурный мониторинг, пьезокерамика, пьезоактюатор, пьезоэффект, макроволоконные актюаторы, макроволоконные пьезокомпозиты

Для цитирования: Трофимов А. А., Здобнов С. А., Забродин С. О., Фокина Е. А. Вопросы разработки технологии изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезокерамических материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 51–60. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

QUESTIONS OF DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY AND MANUFACTURING OF SENSOR AND ACTUATOR ELEMENTS OF THE SYSTEMS OF STRUCTURAL PERFORMANCE MONITORING BASED ON PIEZOCERAMIC MATERIALS

A.A. Trofimov¹, S.A. Zdobnov², S.O. Zabrodin³, E.A. Fokina⁴

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

¹ alex.t1978@mail.ru, ² sa_zdobnov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ekaterina.isay1997@gmail.com

Abstract. *Background.* As of today in Russia there are no scientific-technical and experimental-technological reserves on development of systems of structural monitoring of serviceability of products and objects of rocket-space technology

(RST) and ground space infrastructure (GSI) with transducers of physical quantities on the basis of macrofiber actuators on the basis of inverse piezo effect necessary for full assessment of reliability of technically complex objects by non-destructive methods. The development of the latest generation of aerospace structures requires the creation of advanced materials that would have high physical and mechanical parameters, meet reliability and durability requirements for specific tasks. Great importance is also given to active materials and structures capable of forming functional shapes and profiles depending on the external influence, i.e. to ensure the fulfillment of one of the principles of the motion control concept – adaptronics. The formation of functional shapes and profiles will provide optimal wing aerodynamic profile, better maneuverability of the aircraft, reduce fuel, energy consumption and provide better remote control in extreme space conditions. The purpose of this article is to create a scientific-technical and experimental-technological reserve for the development of advanced technologies for the production of sensor and actuator elements of structural performance monitoring systems based on piezoceramic materials and technologies for incorporation into the elements of composite structures of RST and GSI products in order to control and manage their characteristics to prevent emergencies. *Materials and methods.* The paper considers the structure of the system of structural monitoring of serviceability of products and objects of RST and GSI with transducers of physical quantities on the basis of macrofiber actuators based on the inverse piezo effect. *Results.* As a result of technology implementation, import-independent self-regulating adaptive structures of spacecraft structures and equipment will be created on the basis of controllable properties of materials with response to external influences. Implementation of the technology will make it possible to create an effective system for controlling vibrations of structural elements. The developed piezoactuators will find applications in structural monitoring systems of the aerospace industry in rocket and space technologies and mechanical engineering.

Keywords: mathematical model, structural monitoring, piezoceramics, piezoactuator, piezo effect, macrofiber actuators, macrofiber piezocomposites

For citation: Trofimov A.A., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Fokina E.A. Questions of development of the technology and manufacturing of sensor and actuator elements of the systems of structural performance monitoring based on piezoceramic materials. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):51–60. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

Основная часть

Основой концепции работы является развитие структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов ракетно-космической промышленности, основанной на использовании современных информационно-измерительных систем, имеющих в своем составе сенсоры на основе наноразмерных пьезоэлектрических пленок и пьезоактюаторы [1, 2].

Актуальность работы определяется распространенностью задач структурного мониторинга характеристик конструктивных элементов изделий ракетно-космической техники (РКТ) и объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций [3]. Контроль и управление техническим состоянием конструктивных элементов изделий в течение всего периода возможного проявления деформационного воздействия должен носить систематический характер и позволять осуществлять оценку происходящих изменений и структурных нарушений на основе количественных критериев, а также позволять управлять и компенсировать процессы потенциально опасных вибраций, шумов и механических напряжений.

Разработка аэрокосмических структур последнего поколения требует создания новейших материалов, которые имели бы высокие физические и механические параметры, отвечали бы требованиям по надежности и ресурсу прочности для решения специфических задач. Большое значение отводится также активным материалам и структурам, способным формировать функциональные формы и профили в зависимости от внешнего воздействия, т.е. обеспечивать выполнение одного из принципов концепции управления перемещением – адаптроники. Формирование функциональных форм и профилей позволит обеспечивать оптимальный аэродинамический профиль крыла, лучшую маневренность летательного аппарата, снизить потребление топлива, энергии и обеспечить лучший дистанционный контроль в экстремальных условиях космоса.

Большинство современных методов неразрушающего мониторинга и контроля изделий и объектов РКТ и НКИ осуществляется либо в ходе производства узлов и структур, либо в ходе их эксплуатации, но при этом работа изделия должна быть приостановлена, что не всегда возможно и требует дополнительных временных и экономических затрат.

Ряд аварий и катастроф с ракетно-космической техникой, произошедших в США в конце 90-х гг. прошлого века, заставили специалистов этой области коренным образом пересмотреть вопросы мониторинга работоспособности технически сложных объектов. Первыми поставили эту проблемы военные, которые в 2001 г. подчеркнули важность осуществления мониторинга

работоспособности в режиме реального времени ракетно-космической техники в целях обеспечения ее высокого уровня надежности, безопасности во время хранения, на боевом дежурстве и в ходе полетов (пусков), а также снижения времени простоя вследствие ее технического обслуживания. В этом же году совместно с НАСА было проведено обсуждение необходимости применения такого мониторинга для перспективных летательных аппаратов умеренной стоимости, способных многократно выходить в космос.

Особую актуальность этой работе придавала трагедия 2003 г. с космическим многоразовым кораблем «Колумбия», после чего НАСА окончательно определилась с новой концепцией, получившей название «Структурный мониторинг работоспособности» (СМР) – (*Structural Health Monitoring – SHM*). Эта новая концепция оценки надежности технически сложных объектов неразрушающими методами основана на использовании структурного отклика объекта в ходе его функционирования (эксплуатации) с целью определения уровня его работоспособности и оценки оставшегося ресурса с помощью аппаратуры, интегрированной или имплантированной в объект. СМР является ключевым компонентом перспективных систем прогнозирования дефектов и определения оставшегося уровня работоспособности объектов.

Основными компонентами СМР являются:

- актюаторы для возбуждения колебаний в конструкции;
- сенсоры для приема сигнала или отклика;
- алгоритм обработки сигнала с целью выявления дефекта или его признака, измерения его параметров;
- компьютер или микроконтроллер для управления процессом мониторинга и обеспечения его алгоритма работы;
- телеметрия – компонент передачи данных о состоянии узла, конструкции или всего объекта;
- источник электроэнергии (батарея, бортовая сеть или система утилизации энергии).

Задачи по структурному мониторингу характеристик конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ, авиационной и гражданской техники с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций, а также формированию функциональных форм для обеспечения оптимального аэродинамического профиля конструктивных элементов изделий авиационной техники возможно решить, используя макроволоконные актюаторы на основе обратного пьезоэффекта, способные реагировать на изменение внешних или внутренних условий (изменяя свое статическое и динамическое поведение), а также быть использованными в качестве сенсоров. Макроволоконные актюаторы на основе обратного пьезоэффекта способны получать информацию и реагировать на изменение внешних или внутренних условий [4, 5]. В общем виде их можно представить как материалы и структуры с четырьмя встроенными функциями: процессорной, сенсорной, исполнительной и восстановительной. С применением макроволоконных актюаторов, обладающих вышеперечисленными функциями, возможно реализовывать следующее [6]:

- преобразование измеряемой величины в пропорциональный электрический сигнал;
- одновременное измерение нескольких физических величин;
- компенсация частотной и температурной погрешностей метрологических характеристик, вызванных неизмеряемыми воздействиями и влияющими факторами;
- подавление нежелательных резонансных колебаний, вибраций, шумов управляемым демпфированием;
- адаптация к условиям эксплуатации;
- осуществление задач адаптроники и др.

В настоящее время в России отсутствуют научно-технический и экспериментально-технологический заделы по разработке систем структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов РКТ и НКИ с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта.

Преимуществом разрабатываемой СМР по сравнению с инновационными разработками аналогичного назначения за рубежом является использование комплексного подхода при разработке физико-математических и топологических моделей, программ расчета по локализации макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта с точки зрения удовлетворения конструктивно-механических требований по надежности конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ, а также структурно-алгоритмических моделей конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ для обеспечения инкорпорирования макроволоконными актюаторами.

Проблемные области в России и за рубежом указаны на рис. 1.



Рис. 1. Проблемные области в России и за рубежом

Целью данной статьи является создание научно-технического и экспериментально-технологического задела по разработке перспективных технологий изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезокерамических материалов и технологий встраивания в элементы композитных конструкций изделий РКТ и НКИ с целью контроля и управления их характеристиками для предупреждения возникновения аварийных ситуаций. Повышение надежности, безопасности и улучшение аварийной защиты при стендовой отработке и эксплуатации изделий РКТ и объектов НКИ на основе принятия упреждающего решения на интервал прогноза по результатам оперативного поиска места, локализации, анализа, оценки и прогнозирования степени и динамики развития дефектов на интервале принятия решения.

Для реализации поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- исследование требований, предъявляемых со стороны систем СМР изделий РКТ и НКИ к актюаторам на основе пьезоэлектрического эффекта;
- разработка методики выбора пьезоматериала по критериям обеспечения максимальной точности, чувствительности и надежности при комплексном воздействии внешних факторов;
- разработка методик обеспечения заданных режимов хода и генерирования силы с исключением возможности деполяризации пьезоматериалов;
- исследование и разработка технологии, обеспечивающей уменьшение гистерезиса, последействия и ползучести пьезоэлементов;
- исследование и разработка конструктивных и технологических решений по созданию осевых, сдвиговых, изгибных пьезоактюаторов для имплантации в исследуемые конструктивные элементы;
- исследование и разработка технологий создания осевых, сдвиговых и изгибных пакетных актюаторов для режимов работы в статическом режиме и на резонансной частоте на основе объемной пьезокерамики, пьезоэлектрических пленок и макроволоконных композитов;
- разработка конструктивных и технологических решений по инкорпорированию и монтажу пьезоактюаторов на элементах конструкции изделий РКТ и НКИ.

Чувствительные элементы датчиков физических величин на основе макроволоконных пьезоактюаторов, входящих в состав систем СМР, обладают следующими достоинствами:

- компонент бандажного типа;

- активный материал – серийная пьезокерамика;
- групповой технологический процесс производства;
- высокая повторяемость серийного производства;
- высокая надежность работы в условиях больших деформаций;
- хорошая герметичность конструкции;
- легкая интеграция с изделиями и объектами и имплантация в их конструкции;
- имплантация макроволоконных пьезокомпозитов в структуру волоконно-армированных пластиков и волоконно-металлических ламинатов для создания матричных конструктивных композитов и металлических сот с интегрированными функциями датчиков, актюаторов и генераторов.

Структура системы СМР изделий РКТ и объектов НКИ представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структура системы СМР изделий РКТ и объектов НКИ

Создаваемая система СМР на основе макроволновых пьезоактюаторов должна обладать следующими функциями:

1. Прогнозирование вероятности возникновения и развития нештатных и аварийных ситуаций в процессе наземной и летной эксплуатации РКТ на основе получаемых в режиме реального времени фактических данных о техническом состоянии критически важных конструктивных элементов.
2. Оценка фактического ресурса изделий РКТ в процессе длительной летной и наземной эксплуатации.
3. Обнаружение макро- и микродефектов в конструкционных материалах.
4. Компенсация процессов потенциально опасных вибраций, шумов и механических напряжений управляемым демпфированием.
5. Контроль за накоплением усталостных явлений в конструкционных материалах.
6. Контроль температурного режима конструкционных элементов.
7. Осуществление задач адаптроники.
8. Дистанционная передача данных в режиме реального времени.

В процессе работы планируется создание новых базовых и критических технологий:

- технология изготовления макроволоконных актюаторов и сенсоров на основе прямого и обратного пьезоэффекта;
- технология изготовления сенсоров, сенсорных сетей на основе макроволоконных пьезоактюаторов;
- технология определения величин рабочих нагрузок и параметров окружающей среды, воздействующих на структуру;
- технология определения наличия дефектов, его локализации и определения параметров;
- технология определения механических повреждений, вызванных нагрузками и воздействием окружающей среды;
- технология прогнозирования работоспособности в зависимости от увеличения повреждений;

– технология изготовления систем СМР на основе датчиков и макроволновых актюаторов для осуществления мониторинга работоспособности изделий РКТ и объектов НКИ и выдача управляющих воздействий, компенсирующих деструктивные процессы в режиме реального времени.

Сравнительные характеристики разрабатываемой пьезокерамики и пьезо-МЭМС-актюаторов и аналогов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Сравнительные характеристики пьезокерамики и аналогов

Наименование характеристики и единица измерения	Значения показателей			
	Объект разработки		Отечественные и зарубежные объекты аналогичного назначения (с указанием моделей фирм, стран, года известности)	
			НЦТС-1 ОАО «Элпа», РФ	APC International, LTD (США) PI, Великобритания
Точка Кюри, °C	400		175	360
Тангенс угла диэлектрических потерь, %	1,0		2,0	1,7
Пьезоэлектрический модуль, d_{33} , 10^{-12} Кл/Н, 10^{-12} м/В – d_{31} – d_{15}	700 550		–260 550	650 270
Механическая добротность, Q	1000		–	1000
Максимальная нагрузка по креплению на 1 мм толщины, В/мм	Постоянный ток	800	–	800
	Переменный ток	400	–	400
Относительная диэлектрическая проницаемость $KT = \epsilon_{33}/\epsilon_0$	4000		4000	3400

Таблица 2

Сравнительные характеристики разрабатываемых пьезо-МЭМС-актюаторов и аналогов

Наименование показателей	Значение показателей		
	Объект разработки	Отечественные и зарубежные объекты аналогичного назначения (с указанием моделей, фирм, стран)	
		Отечественный объект	Зарубежный объект
Ход, мм	1...50	до 5,12	до 50
Минимальный шаг перемещения, нм	10,0	–	1,8 мкм
Точность, нм	10,0	–	0,6 мкм
Скорость перемещения максимальная, мм/с	0,5	–	до 150
Напряжение питания, В	минус 30...100	100...150	–
Тяговое усилие, $10 \cdot 10^{-3}$ Н, не менее	350,0	1200 Н (при $U_{пит} = 150$ В)	8 Н
Габаритные размеры (масса) пьезопривода, мм, не более	38 × 22 × 5	Ø16 × 32	(0,47 кг)

Области применения систем СМР представлены на рис. 3.



Рис. 3. Области применения систем СМР

Области применения макроволновых композитов в системах СМР для космической и наземной робототехники представлены в табл. 3.

Таблица 3

Области применения макроволновых композитов в системах СМР
для космической и наземной робототехники

Сенсорные устройства захвата манипулятора	Датчики тактильные, давления, проскальзывания, приближения, рабочей операции захвата
Силовые сенсорные устройства	Датчики рассогласования в следящем приводе, крутящего момента в шарнире исполнительного органа манипулятора, запястья захвата манипулятора, силы захвата
Сенсорные устройства внешней среды	Датчики и системы технического зрения, акустические, температуры, влажности, газового анализа, столкновения, внешнего удара
Сенсорные устройства позиционирования, положения и ориентации	Датчики направления, курса, крена, тангажа, положения по маркеру, положения по длительности перемещения, оптические, ультразвуковые, инфракрасные
Сенсорные устройства обеспечения безопасности	Датчики обнаружения препятствия, детекторы аварийных ситуаций по напряжению электропитания, давления масла в гидроприводе, выделения тепла, крутящего момента
Сенсорные устройства специального назначения	Датчики целеуказания, наведения, готовности, контроля исполнения

Для разработки и внедрения промышленной технологии необходимо провести следующие мероприятия:

1) исследование требований, предъявляемых со стороны систем СМР конструкций РКТ и НКИ к сенсорам и актюаторам на основе пьезоэлектрического эффекта;

2) разработку методики выбора пьезоматериала по критериям обеспечения максимальной точности, чувствительности и надежности при изменении температуры эксплуатации, вибрационных и ударных ускорений в широких диапазонах;

3) разработку методик обеспечения заданных режимов хода и генерирования силы с исключением возможности деполяризации пьезоматериалов;

4) разработку математических моделей, описывающих влияние гистерезиса, последствия и ползучести пьезоэлементов на процессы деформации пьезоэлементов сенсоров и актюаторов;

5) исследование и разработку технологии, обеспечивающей уменьшение гистерезиса, последствия и ползучести пьезоэлементов;

6) исследование и разработку конструктивных и технологических решений по созданию пьезоэлементов для сенсоров и осевых, сдвиговых и изгибных пьезоактюаторов для имплантации в исследуемые конструктивные элементы;

7) разработку конструктивных и технологических решений по инкорпорированию и монтажу пьезоэлементов в элементы конструкций РКТ и НКИ.

Полученная научно-техническая продукция будет обладать следующими характеристиками:

1) отсутствие технологической зависимости отечественных производителей датчиков на пьезокерамических тонких пленках и пьезокомпозитах, а также макроволоконных композитных пьезоактюаторов от производства импортных компонентов и пьезоматериалов;

2) использование отечественных пьезокомпозитных материалов для создания осевых, сдвиговых, изгибных актюаторов и сенсоров на основе пьезоэффекта, а также технологий инкорпорирования (встраивания) сенсорных и актюаторных элементов конструкции изделий РКТ и НКИ;

3) универсальность при создании схемных решений по обеспечению энергетической совместимости сенсоров и пьезоактюаторов с заданными характеристиками с целью компенсации влияния внешних воздействующих факторов.

В результате разработаны макеты актюаторов на основе пьезоэлектрических пленок со следующими характеристиками:

Относительная деформация, % 0,18;

Генерируемая сила, кН/см² 9;

максимальное управляющее напряжение, В 100.

Макеты пьезоэлектрических пленок для датчиков быстропеременных процессов:

Пьезочувствительность d_{31} , пКл/Н от 2 до 5;

Пьезочувствительность d_{33} , пКл/Н, от 5 до 15;

Диапазон рабочих температур, °С минус 196 до +350.

Макеты пьезоактюаторов на основе макроволоконных композитов со следующими параметрами:

температура точки Кюри T_K °С, 260;

пьезомодуль d_{31} 10–12 Кл/Н не менее 200;

пьезомодуль d_{33} 10–12 Кл/Н не менее 500;

управляющее напряжение, В не более 100.

Результаты

В результате реализации технологии будут созданы импортонезависимые саморегулируемые адаптивные структуры конструкций и оборудования космических аппаратов на основе управляемых свойств материалов с реакцией на внешние воздействия.

Внедрение технологии позволит создать эффективную систему управления колебаниями элементов конструкции. Это обусловлено тем, что для управления аэродинамическими поверхностями, в том числе для демпфирования их колебаний, обусловленных, например, резкими эволюциями летательного аппарата, а также флаттером или бафтингом, требуются, с одной стороны, смещения (усилия) на торцах пьезоэлементов, существенно превышающие смещения, получаемые в конструкциях прецизионных актюаторов, а с другой стороны, адаптивность управляющих воздействий к внешним нагрузкам.

Разработанные пьезоактюаторы найдут применения в системах структурного мониторинга авиакосмической промышленности для контроля вибрации лопасти ротора вертолета, управления тягой руля поворота беспилотного летательного аппарата, плоскостей, контроля и управления вибрацией кронштейнов и выносов элементов конструкции радиотехнических устройств и систем космических аппаратов, контроля и управления вибрацией рулей направления, в промышленности – для измерения деформаций изделий, в системе управления станка

точечной сварки, в устройствах позиционирования, контроля вибрации вращающихся валов, турбин и т.п., а также в РКТ для управления трансформируемыми крупногабаритными конструкциями солнечных батарей КА, антенн, радиомачт, солнечного паруса системами позиционирования на основе актюаторов ПКМ с памятью формы и датчиков контроля температуры и положения. Автокалибровка микромеханических акселерометров на основе МЭМС пленочных слоистых секционных или несекционных пьезоактюаторов со встроенными датчиками с обратной связью. Позиционирование поворотного элемента бортовой антенны для микроперемещений системой на основе монолитных и наборных пьезокерамических пьезоактюаторов с блоками питания, мультипликаторами и датчиками состояния.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. 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.
3. Баринов И. Н., Кучумов Е. В., Волков В. С., Евдокимов С. П. Вопросы разработки и создания адаптивных смарт-материалов на основе пьезоактюаторов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 8. С. 12–19.
4. Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А. [и др.]. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 90–95.
5. Губич И. А., Кикот В. В., Трофимов А. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. тр. XXXIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2021. С. 98–103.
6. Николаев А. В., Блинов А. В., Жуков С. Н. Актуальные проблемы создания систем структурного мониторинга работоспособности автоматических космических аппаратов // Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Проблемы создания служебных и научных систем : сб. тр. Второй науч.-техн. конф. с междунар. участием. Анапа, 2017. С. 92–104.

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. 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.)
3. Barinov I.N., Kuchumov E.V., Volkov V.S., Evdokimov S.P. Issues of development and creation of adaptive smart materials based on piezoactuators. *Pribery i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2015;(8):12–19. (In Russ.)
4. Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A. et al. Research of technology for creating high-temperature textured materials for the manufacture of multilayer piezoelectric elements of converters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):90–95. (In Russ.)
5. Gubich I.A., Kikot V.V., Trofimov A.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. tr. XXXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of automation and control in technical systems : collection of tr. XXXIV International Scientific and Technical conf.* Penza, 2021:98–103. (In Russ.)
6. Nikolaev A.V., Blinov A.V., Zhukov S.N. Actual problems of creating systems for structural monitoring of the operability of automatic spacecraft. *Innovatsionnye avtomaticheskie kosmicheskie apparaty dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy. Problemy sozdaniya sluzhebnykh i nauchnykh sistem: Vtoraya nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Anapa, 2017) = Innovative automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research. Problems of creating service and scientific systems : The second scientific and technical conf. with the international participation*. Anapa, 2017:92–104. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Алексей Анатольевич Трофимов**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Alexei A. Trofimov

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

Сергей Александрович Здобнов

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

Sergey A. Zdobnov

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

Станислав Олегович Забродин

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

Stanislav O. Zabrodin

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

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ekaterina.isay1997@gmail.com

Ekaterina A. Fokina

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 15.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2024

Принята к публикации / Accepted 08.04.2024

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.3.08

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Д. В. Якушов¹, Е. А. Печерская²

¹Промышленно-коммерческая фирма «Полет», Заречный, Пензенская обл., Россия

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

¹hammer.fate@yandex.ru, ²iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является обратноходовой преобразователь. Предметом исследования является влияние эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) конденсаторов на передаточную характеристику каскада преобразования. Целью является выявление необходимости учета ЭПС конденсаторов на этапе разработки обратноходового преобразователя. *Материалы и методы.* Для определения влияния ЭПС конденсаторов на передаточную характеристику каскада преобразования используется малосигнальная модель Кристофа Бассо. *Результаты.* В результате было выявлено сильное влияние ЭПС конденсаторов на частотах, выше нуля передаточной функции, образованного ЭПС конденсаторов, в особенности в области субгармонических осцилляций. *Выводы.* Установлено, что на этапе проектирования источника питания крайне важно учитывать ЭПС конденсаторов и обеспечить устойчивую работу источника питания при любых возможных его значениях.

Ключевые слова: преобразование, конденсаторы, питание, устойчивость, характеристика, частота

Для цитирования: Якушов Д. В., Печерская Е. А. Влияние эквивалентного последовательного сопротивления выходных конденсаторов на передаточную функцию обратноходового преобразователя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 61–66. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

INFLUENCE OF EQUIVALENT SERIES RESISTANCE OF OUTPUT CAPACITORS ON THE TRANSFER FUNCTION OF FLYBACK CONVERTER

D.V. Yakushov¹, E.A. Pecherskaya²

¹Industrial and commercial company "Polyot", Zarechny, Penza region, Russia

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

¹hammer.fate@yandex.ru, ²iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The object of study is a flyback converter. The subject of the study is the influence of the equivalent series resistance (ESR) of capacitors on the transfer characteristic of the conversion stage. The goal is to identify the need to take into account the ESR of capacitors at the stage of development of a flyback converter. *Materials and methods.* To determine the influence of the ESR of capacitors on the transfer characteristic of the conversion stage, the small-signal model of Christophe P. Basso is used. *Results.* As a result, a strong influence of the ESR of capacitors was revealed at frequencies above the zero of the transfer function formed by the ESR of capacitors, especially in the region of subharmonic oscillations.

Conclusions. It has been established that at the design stage of a power supply it is extremely important to take into account the ESR of capacitors and ensure stable operation of the power supply at any possible value.

Keywords: conversion, capacitors, power supply, stability, characteristic, frequency

For citation: Yakushov D.V., Pecherskaya E.A. Influence of equivalent series resistance of output capacitors on the transfer function of flyback converter. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):61–66. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-7

Введение

Источник питания – важнейший элемент любой системы, предназначенный для преобразования электрической энергии. От качества источника питания зависит работа всей системы. Наиболее распространенным видом преобразователя питания является обратноходовой преобразователь. Обратноходовой преобразователь обладает рядом преимуществ: малое количество компонентов, а значит, и невысокая стоимость, высокая надежность, компактность, наличие гальванической развязки, нечувствительность к короткому замыканию в нагрузке. Однако основным недостатком является ограниченная мощность – обратноходовые преобразователи рационально применять до мощности 100 Вт. На более высоких мощностях требуются компоненты, позволяющие пропускать через себя значительные токи, и коэффициент полезного действия (КПД) такого преобразователя становится менее 80 %. Таким образом, если требуется гальваническая развязка первичной и вторичной цепей, то до мощности 100 Вт обратноходовой преобразователь – лучшее решение. Широкое распространение обратноходовых преобразователей привело к изготовлению специальных микросхем, на основе которых реализуются обратноходовые преобразователи. Наиболее распространенные из них – TOPSwitch, TINYswitch и т.д. При применении готовых микросхем требуется минимальное количество внешних компонентов – силовой транзистор, генератор, регулирующие элементы уже встроены в саму микросхему. Как и любой источник питания, обратноходовой преобразователь требует точного и правильного расчета контура обратной связи. Устойчивость работы напрямую зависит от корректности данного расчета [1].

Работа обратноходового преобразователя

Основным элементом обратноходового преобразователя является трансформатор. Данный трансформатор также называют многообмоточным дросселем ввиду того, что в отличие от прямоходового преобразователя данный трансформатор передает энергию, запасенную при открытии транзистора, на вторичную сторону. Обмотки гальванически развязаны и любой обратноходовой трансформатор имеет как минимум две обмотки – первичную и вторичную. Также часто применяют обмотку самопитания для обеспечения питания ШИМ-контроллера первичной («горячей») стороны. Если количество формируемых напряжений более одного, то количество обмоток дросселя увеличивается на количество дополнительных выходов напряжения [2]. Название «обратноходовой» означает, что энергия передается на обратном ходу, т.е. когда силовой ключ закрыт. На рис. 1 изображен силовой каскад.

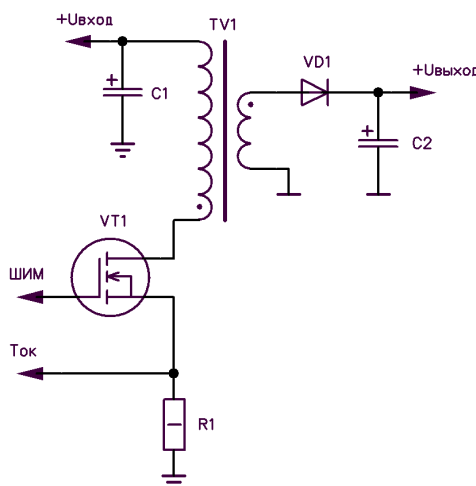


Рис. 1. Силовой каскад обратноходового преобразователя

На прямом ходу транзистор VT1 открыт, ток через первичную обмотку TV1 линейно нарастает, в сердечнике трансформатора TV1 запасается энергия за счет нарастания магнитного потока, диод VD1 находится в обратном смещении, а значит, ток через вторичную обмотку не протекает. На обратном ходу транзистор VT1 закрывается и за счет противофазного включения первичной и вторичной обмоток происходит прямое смещение диода VD1, энергия передается из вторичной обмотки через диод VD1 в конденсатор C2. Из рис. 1 видно, что обратногододовый преобразователь для работы требует один транзистор, один диод, выходной конденсатор и трансформатор, что и является его основным преимуществом (простота реализации). Выходное напряжение регулируется за счет соотношения времени открытия и закрытия транзистора VT1. Из рис. 1 также видно, что конденсатор C2 является важным элементом обратногододового преобразователя, а значит, его характеристики будут влиять на работу всего источника питания в целом [1].

Конденсаторы наряду с их наиболее известными параметрами, такими как емкость и напряжение имеют множество других параметров – эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС или ESR), эквивалентная последовательная индуктивность, импульсный ток (ripple current) и так далее. Все эти параметры оказывают влияние на работу обратногододового преобразователя.

Каскад преобразования обратногододового преобразователя

В основе работы большинства обратногододовых преобразователей лежит управление по пиковому току. В пределах каждого цикла переключения силового транзистора происходит ограничение импульсного тока. Величина токового порога ограничения задается, как правило, усилителем ошибки напряжения (в контуре ОС), напряжение с выхода которого поступает на инвертирующий вход токового компаратора (рис. 2).

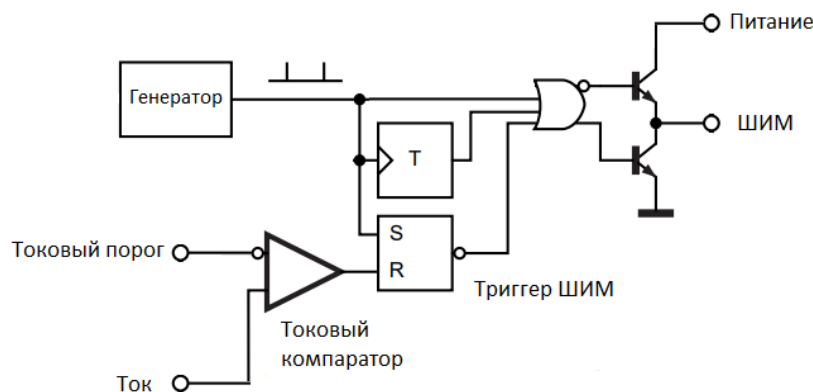


Рис. 2. Структура цепей управления обратногододового преобразователя

На рис. 2 показано, как сигнал «ШИМ» поступает непосредственно на затвор силового полевого транзистора VT1 (рис. 1). Сигнал «Ток» поступает на вход токового компаратора непосредственно с шунта, стоящего в истоке силового полевого транзистора (рис. 1). Совокупность токового компаратора, генератора, триггера ШИМ, силового транзистора, трансформатора, диода, выходного конденсатора образует каскад преобразования, обладающего передаточной характеристикой. Каскад преобразования рассматривается как четырехполюсник, вход которого – сигнал токового порога, а выход – напряжение выхода обратногододового преобразователя [3]. Цепи коррекции контура обратной связи, оптрона и т.д. в каскад преобразования не входят.

Передаточная характеристика каскада преобразования

Передаточная характеристика каскада преобразования описывается следующей формулой:

$$H(s) = A_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 - \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{\left(1 - \frac{s}{\omega_{p1}}\right)} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_n Q_p} + \frac{s^2}{\omega_n^2}}, \quad (1)$$

где A_C – усиление по постоянному току, ω_{z1} – циклическая частота нуля передаточной функции, образованного ЭПС конденсаторов, ω_{z2} – циклическая частота нуля правой полуплоскости, ω_{p1} – циклическая частота главного полюса, ω_n – циклическая частота субгармонических осцилляций, Q_p – добротность преобразователя на частоте субгармонических осцилляций [3].

Усиление по постоянному току A_C в формуле (1) не имеет частотной зависимости, а значит, выходные конденсаторы не оказывают влияние на эту величину. Составляющие ω_{p1} и Q_p зависят только от характера работы преобразователя, скважности и скоростей нарастания токового сигнала и сигнала коррекции его наклона. Ноль правой полуплоскости ω_{z2} также не имеет зависимости от выходных конденсаторов. Главный полюс образован работой источника тока (управление по пиковому току) на емкостную нагрузку и зависит от величины емкости выходных конденсаторов, скважности и т.д.. Зависимость от величины ЭПС конденсаторов имеет только величина ω_{z1} , что описывает выражение (1):

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_{ESR} C_{out}}, \quad (2)$$

где R_{ESR} – эквивалентное последовательное сопротивление выходных конденсаторов; C_{out} – емкость выходных конденсаторов [4].

АЧХ каскада преобразования

Для примера будет рассмотрен обратноходовой преобразователь, имеющий следующие параметры: выходное напряжение – 3,3 В, выходной ток – 10 А, входное напряжение – 24 В, индуктивность первичной обмотки трансформатора – 82 мкГн, соотношение витков трансформатора – 26:5, сопротивление токового шунта – 180 мОм, емкость выходных конденсаторов – 4700 мкФ, частота преобразования – 100 кГц. В условиях, что эквивалентное последовательное сопротивление выходных конденсаторов равно 10 мОм, передаточная функция примет вид, изображенный на рис. 3.

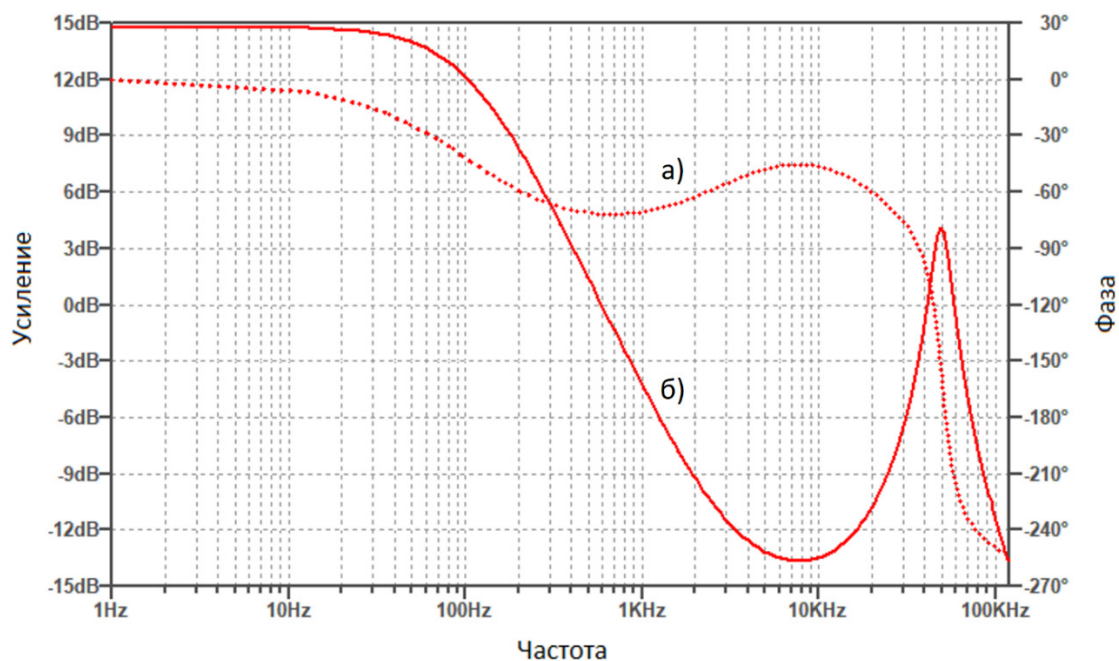


Рис. 3. Передаточная функция с ЭПС 10 мОм:
а – ФЧХ; б – АЧХ

На рис. 3 хорошо виден пик субгармонических осцилляций, в данном примере подразумевается, что коррекции наклона токовой пилы нет. При увеличении величины ЭПС в 5 раз до 50 мОм передаточная функция примет вид, изображенный на рис. 4.

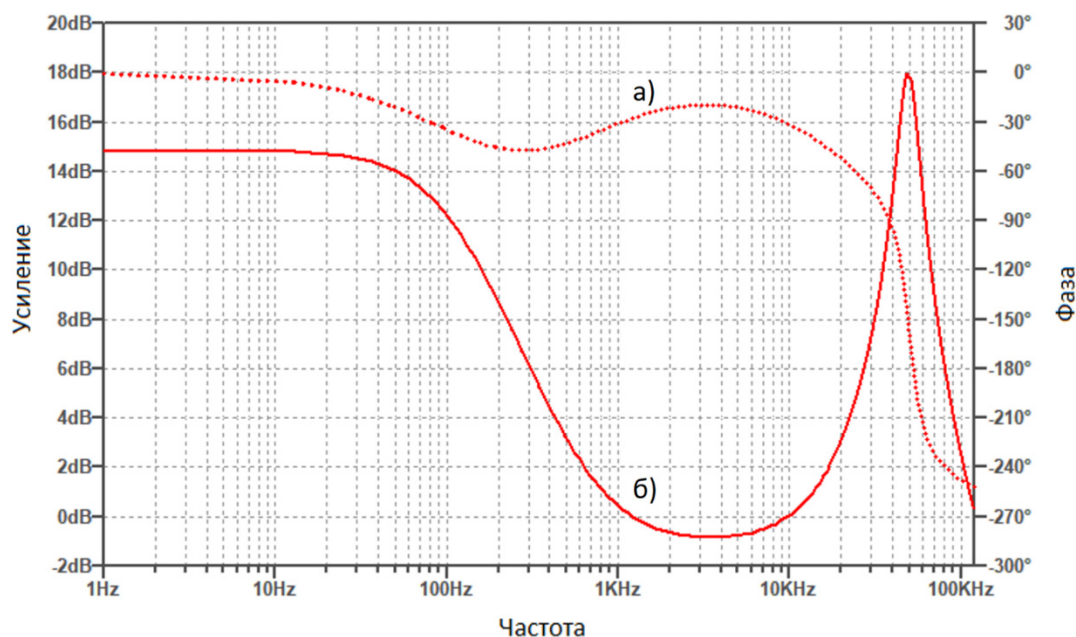


Рис. 4. Передаточная функция с ЭПС 50 мОм:
а – ФЧХ; б – АЧХ

Из рис. 4 видно, что характеристика сильно изменила свою форму, пик субгармонических осцилляций достигает 18 дБ, вместо 4 дБ в случае с ЭПС, равным 10 мОм. Также сильно изменилось усиление на частотах выше нуля ω_{z1} . В данном примере для наглядности показано сильное изменение ЭПС (в 5 раз), однако даже незначительное изменение ЭПС может оказать влияние на устойчивость работы всего обратноходового преобразователя.

Проектирование цепей коррекции АЧХ должно производиться таким образом, чтобы источник питания оставался устойчивым во всем возможном диапазоне ЭПС конденсаторов из-за изменения температуры, технологического разброса, старения. Разработчику необходимо оценить пределы изменения ЭПС конденсаторов и обеспечить минимальный запас по фазе 45° на частоте единичного усиления и минимальный запас по усилению 10 дБ в месте, где характеристика достигает 180° во всем возможном диапазоне ЭПС выходных конденсаторов [5].

Заключение

Величина ЭПС конденсаторов способна оказывать значительное влияние на устойчивость работы обратноходового преобразователя. На этапе проектирования необходимо оценить пределы изменения ЭПС и обеспечить выполнения критериев устойчивости во всем его диапазоне. ЭПС может значительно изменяться в ходе температурных отклонений. Также немаловажным является увеличение ЭПС в ходе старения конденсаторов. Игнорирование этих факторов может вызывать самовозбуждение преобразователя, а значит, снижение качества формируемого напряжения, повышение помех и, возможно, выход из строя всего устройства.

Список литературы

1. Brown M. Power Supply Cookbook (EDN Series for Design Engineers). London : George Newnes Ltd, 2001. 280 p.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М. : Мир, 1982. 512 с.
3. Basso C. Transfer functions of switching converters. Apache Junction : Stairway Press, 2021. 704 p.
4. Basso C. Switch-mode power supplies. SPICE Simulations and Practical Designs. New York : McGraw-Hill Professional, 2008. 889 p.
5. Rozenblat L. Switching Power Supply Design: A Concise Practical Handbook. North Charleston : Independently Published, 2021. 110 p.

References

1. Brown M. Power Supply Cookbook (EDN Series for Design Engineers). London: George Newnes Ltd, 2001:280.

2. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika = Semiconductor circuit engineering*. Moscow: Mir, 1982:512. (In Russ.)
3. Basso C. *Transfer functions of switching converters*. Apache Junction : Stairway Press, 2021:704.
4. Basso C. *Switch-mode power supplies. SPICE Simulations and Practical Designs*. New York: McGraw-Hill Professional, 2008:889.
5. Rozenblat L. *Switching Power Supply Design: A Concise Practical Handbook*. North Charleston: Independently Published, 2021:110.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Викторович Якушов

ведущий инженер-схемотехник,
конструкторское бюро,
Промышленно-коммерческая фирма «Полет»
(Россия, Пензенская область, г. Заречный,
пр-д Индустриальный, 6);
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: hammer.fate@yandex.ru

Dmitry V. Yakushov

Leading circuit engineer,
design bureau,
Industrial and Commercial Company "Polyot"
(6 Industrialny passage, Zarechny,
Penza region, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

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

Поступила в редакцию / Received 19.03.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2024

Принята к публикации / Accepted 17.05.2024

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

УДК 004.946

doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-8

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ НА ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ

А. К. Алимуратов¹, Д. С. Чернышов², О. С. Симакова³,
А. Н. Тычкова⁴, Д. Л. Овчинников⁵

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

¹alansapfir@yandex.ru, ²deniska_1980_13@mail.ru, ³zcsio@mail.ru, ⁴tychkova-anna@mail.ru, ⁵dmitry_ovch@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные информационные технологии (машинное обучение, обработка больших данных, виртуальная (VR) и дополненная реальность и др.) открывают новые возможности перед специалистами в различных сферах деятельности. VR активно развивается и представляет собой перспективную область знаний в неврологии и психиатрии. VR предлагает альтернативу созданию стимулов, максимально приближенных к реальным. Целью данной работы является проведение аналитического обзора в предметной области и сформулировать предпосылки для создания адаптивных технологий виртуальной реальности на пути реабилитации пациентов. *Материалы и методы.* Выполнен поисковый запрос научно-технической литературы в открытых российских и международных базах данных. Проанализировано более 100 публикаций по направлению исследований, формулирующих предпосылки для создания адаптивных виртуальных решений. *Результаты.* Результаты исследования показали, что VR открывает новые возможности для индивидуализированного подхода к реабилитации пациентов, позволяя более точно оценить прогресс и адаптировать программы реабилитации под каждого пациента. *Выводы.* Виртуальная реальность также может быть использована для объективной оценки эффективности реабилитационных программ и измерения прогресса на основе качественных измерительных показателей, что в свою очередь способствует определению эффективности проводимых мероприятий по лечению пациентов.

Ключевые слова: виртуальная реальность, адаптивные технологии, неврология и психиатрия

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта № FSGE-2023-0006 «Социально-средовая, социально-педагогическая и социально-психологическая реабилитация детей-инвалидов с психическими расстройствами и расстройствами поведения» за счет средств федерального бюджета.

Для цитирования: Алимуратов А. К., Чернышов Д. С., Симакова О. С., Тычкова А. Н., Овчинников Д. Л. Виртуальная реальность на пути повышения качества реабилитации пациентов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 67–72. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-8

VIRTUAL REALITY TO IMPROVE THE QUALITY OF PATIENT REHABILITATION

A.K. Alimuradov¹, D.S. Chernyshov², O.S. Simakova³,
A.N. Tychkova⁴, D.L. Ovchinnikov⁵

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

¹alansapfir@yandex.ru, ²deniska_1980_13@mail.ru, ³zcsio@mail.ru, ⁴tychkova-anna@mail.ru, ⁵dmitry_ovch@mail.ru

Abstract. *Background.* Modern information technologies (machine learning, big data processing, virtual (VR) and augmented reality, etc.) open up new opportunities for specialists in various fields of activity. VR is actively developing

and represents a promising area of knowledge in neurology and psychiatry. VR offers an alternative to creating stimuli that are as close to real as possible. The purpose of this work is to conduct an analytical review in the subject area and formulate prerequisites for the creation of adaptive virtual reality technologies on the path of patient rehabilitation. *Materials and methods.* A search request for scientific and technical literature was carried out in open Russian and international databases. More than 100 publications in the field of research were analyzed, formulating the prerequisites for creating adaptive virtual solutions. *Results.* The results of the study showed that VR opens up new opportunities for an individualized approach to the rehabilitation of patients, allowing more accurate assessment of progress and adaptation of rehabilitation programs to each patient. *Conclusions.* Virtual reality can also be used to objectively evaluate the effectiveness of rehabilitation programs and measure progress based on qualitative measurement indicators, which in turn helps determine the effectiveness of ongoing patient treatment interventions.

Keywords: virtual reality, adaptive technologies, neurology and psychiatry

Financing: the work was carried out within the framework of the FSGE-2023-0006 project "Socio-environmental, socio-pedagogical and socio-psychological rehabilitation of disabled children with mental disorders and behavioral disorders", at the expense of the federal budget.

For citation: Alimuradov A.K., Chernyshov D.S., Simakova O.S., Tychkova A.N., Ovchinnikov D.L. Virtual reality to improve the quality of patient rehabilitation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):67–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-8

Введение

В настоящее время в мире происходит глобальная цифровизация всех сфер жизни человека, в том числе здравоохранения. Современное поколение не может обойтись без множества цифровых и мобильных устройств. Виртуальная реальность (ВР) как инструмент цифровизации общества и медицины способна искажать информацию, поступающую от органов чувств, изменяя реакции организма и взаимодействуя с созданной средой виртуальной реальности. Эта технология широко используется в играх, тренажерах различного назначения, системах медицинской диагностики и лечения пациентов.

Виртуальная реальность активно развивается и представляет собой перспективную область, особенно в неврологии и психиатрии. Она предлагает альтернативу созданию виртуальных стимулов, которые максимально приближены к реальным и позволяют человеку взаимодействовать с окружающей средой в различных ситуациях. Технология виртуальной реальности является инструментом для развития цифровизации общества и медицины, способным изменять и анализировать информацию от органов чувств, а также взаимодействовать с организмом через созданную виртуальную среду [1]. Технология виртуальной реальности находит широкое применение в игровой индустрии, симуляторах различного назначения, системах медицинской диагностики и лечения пациентов. В настоящее время виртуальная реальность является перспективным и динамично развивающимся направлением. Виртуальная реальность появилась как замена созданию виртуальных стимулов, которые максимально приближены к реальным и позволяют человеку взаимодействовать с окружающей средой в различных ситуациях.

Такая категория людей, как подростки, наиболее подвержена деформации психического состояния и искажению адекватного восприятия мира под воздействием внешних раздражителей, фиксируемых мозгом посредством воздействия виртуальной реальности. Эта категория людей как самостоятельно, так и под контролем родственников чаще всего обращается за медицинской помощью к неврологам. Для постановки диагноза и оценки тяжести состояния врачи субъективно собирают анамнез и интерпретируют субъективные психометрические шкалы. Поэтому отсутствие объективной инструментальной диагностики может привести к необъективной интерпретации и неправильной диагностике.

Уровень психоэмоциональной устойчивости на различные аудиовизуальные стимулы, формируемые современными гаджетами, может негативно влиять на когнитивные способности любого человека абсолютно индивидуально, приводя к снижению бдительности [2], сужению концентрации внимания, снижению кратковременной памяти [3] и снижению регуляции эмоций, что в свою очередь приводит к повышенному риску принятия решений [4] и снижению эффективности работы. Низкий уровень психоэмоциональной устойчивости также приводит к несчастным случаям в различных областях, например, в медицинской промышленности, в военном деле [5] и на транспорте.

Предпосылки для создания адаптивных виртуальных решений

Необходимо создать инструмент, который позволит адаптировать работу современных цифровых устройств под конкретного пользователя, исходя из его индивидуальных предпочтений и уровня психоэмоциональной устойчивости.

Виртуальная реальность – это тип человеко-компьютерного интерфейса, который позволяет пользователям взаимодействовать с компьютерами в режиме реального времени и погружаться в среду, созданную компьютерами. Пользователями VR являются более 40 млн человек в мире (2019 – 35 млн чел., 2020 – 42 млн чел.). Технология VR прошла длинный путь от первых экспериментов в 50-х гг. XX в. до современных беспроводных шлемов в 20-х гг. XXI в. [6]. Применение VR позволяет передавать аудиовизуальные стимулы более реалистично, чем традиционные терапевтические технологии, и обеспечивает безопасную и контролируемую среду. В работе отмечается, что сценарии должны настраиваться в соответствии с состоянием пациента таким образом, чтобы страх, радость и другие эмоции пациента могли быть полностью выражены.

Технология виртуальной реальности оказывает эффективный обезболивающий эффект за счет механизма отвлечения [7], но также способствует активизации антиноцицептивной системы за счет положительных эмоций, которые вызывает среда, созданная с помощью технологии виртуальной реальности. Кроме того, технология виртуальной реальности не имеет выраженных побочных эффектов, таких, какие имеются у фармакологических методов обезболивания.

Основополагающей характеристикой виртуальной реальности, влияющей на особенности поведения и физиологические реакции человека, является визуальное (контент сцены) и аудиомызыкальное сопровождение. И то и другое без контроля со стороны специалиста может пагубно повлиять на работу организма в целом.

Визуальная составляющая виртуальной реальности обеспечивается за счет стереоскопической глубины изображения, которая создает иллюзию того, что человек видит в виртуальном пространстве [8]. Это дает разработчику ряд непосредственных преимуществ: больший контроль над представлением стимула, разнообразие вариантов ответа и потенциально повышенная достоверность. Все это приводит к более широкому использованию виртуальной реальности в качестве инструмента исследования во многих психологических областях, таких как психотерапия [9, 10], спортивная психология и социальные коммуникации [11].

Одним из факторов, определяющим присутствие человека в виртуальной сцене, является уровень погружения, описываемый как уровень сенсорной точности, предлагаемый системой виртуальной реальности. Уровень сенсорной точности характеризуется полем зрения, углом обзора, размером дисплея и стереоскопией [12]. Погружение в виртуальную реальность – это техническое описание возможностей системы, которое определяет уровень детализации, с которым может быть отображена виртуальная сцена. Присутствие же отражает психологическую реакцию пользователя на данную среду. Разные пользователи могут испытывать разный уровень присутствия в виртуальной среде, даже при одинаковом уровне погружения, в зависимости от различных факторов. Виртуальная среда лучше запоминается пользователями, вызывает интенсивные эмоциональные реакции [13], усиливает коммуникативные навыки и более успешно устраняет тревогу, связанную с реальными стрессовыми ситуациями [14]. В то же время создание окружающей среды вызывает ощущение присутствия, которое не полностью зависит от погружения.

В последние годы увеличилось количество пациентов, в том числе детского возраста, страдающих от психических расстройств. Эти расстройства, включая аутизм, депрессию, тревогу и дефицит внимания с гиперактивностью, влияют на качество жизни детей и могут ограничивать их способность общаться, учиться и адаптироваться в обществе [15]. Одной из причин актуальности исследования VR для реабилитации пациентов с психическими нарушениями является ее способность предоставить контролируемое и безопасное окружение, в котором дети могут осваивать навыки и развиваться. Виртуальные среды могут быть настроены для специфических потребностей каждого человека и позволят им тренироваться в ситуациях, которые они встречают в повседневной жизни, но которые могут вызывать стресс или тревогу. Например, дети с аутизмом могут тренироваться в социальных навыках и взаимодействии с окружающими людьми в виртуальном мире, что помогает им лучше адаптироваться в реальности, пациенты с социальной фобией могут учиться взаимодействовать с другими людьми через виртуальные сценарии, такие как разговоры или ситуации групповой деятельности [16].

Заключение

ВР позволит предоставить индивидуализированный подход к реабилитации пациентов. В дальнейшем виртуальные среды будут адаптированы под конкретные потребности каждого человека, изменяя уровень сложности и интенсивности заданий. Это позволит специалистам лучше оценивать прогресс и подстраивать реабилитационные программы для каждого пациента. ВР может быть использована для объективной оценки эффективности реабилитационных программ. Поскольку ВР позволяет создавать стандартизированные задачи и сценарии, она сможет быть использована для измерения прогресса реабилитации на основе качественных измерительных показателей. Такая объективная оценка может помочь специалистам сопоставить конкретные достижения пациентов и определить эффективность проводимых мероприятий по их лечению.

Список литературы

1. Wood E., O'Brien A., Hall J. Effectiveness of Virtual Reality Training for Language Skills in Children with Autism // *Neuropsychologia*. 2013. Vol. 39, № 11. P. 1395–1396.
2. Hartley J., Heath J., Miller L. Emotion Regulation Through Virtual Reality: A Review of Research // *Current Directions in Psychological Science*. 2016. Vol. 15, № 6. P. 385–392.
3. Cohen S., Schoenfield D., Stern N. Interactive Visualization as a Tool for Teaching Language Skills in Children with Autism // *Current Biology*. 2014. Vol. 19, № 10. P. 9419–9422.
4. Stein A. [et al.]. The Effects of Video Games on Social Skills in Children with Autism // *Journal of Autism and Developmental Disorders*. 2017. Vol. 20, № 4. P. 741–754.
5. Birnie C., Bolton S., Wright S. The Effects of Virtual Reality on Experiential Learning in Children with Autism: A Meta-Analytic Review // *British Journal of Educational Psychology*. 2018. Vol. 90, № 4. P. 867–879.
6. Бофанова Н. С., Тычков А. Ю., Дятлов А. В. [и др.]. Технология виртуальной реальности как перспективное направление в терапии послеоперационной и посттравматической боли // *Российский журнал боли*. 2022. Т. 20, № 2. С. 68–72.
7. Bates K., Rosenberg A., McClintock M. Multi-Tasking in the Virtual Environment: Implications for the Development of Emotional Intelligence // *Journal of Consciousness Studies*. 2011. Vol. 5, № 2. P. 173–183.
8. Иванов А. Д. Система адаптивной виртуальной реальности с использованием нейроинтерфейса // *Вестник Пензенского государственного университета*. 2023. № 2. С. 121–126.
9. Levin D., Kohn M., Rose J. Using Virtual Reality to Improve Motor Skills in Children with Autism // *Current Biology*. 2014. Vol. 19, № 10. P. 9390–9400.
10. Wright S., Birnie C., Mitchell P. Effects of Virtual Reality on Learning and Memory in Adolescents with Autism: A Systematic Review and Meta-Analysis // *British Journal of Educational Psychology*. 2020. Vol. 98, № 2. P. 305–312.
11. Bailey C. [et al.]. Virtual Reality Training for Motor Skills in Children with Autism // *Pediatrics*. 2015. Vol. 129, № 1. P. 67–76.
12. Darken R. P., Peterson B. Spatial orientation, wayfinding, and representation // In *Handbook of virtual environments*. 2002. P. 493–517.
13. Тычков А. Ю., Чернышов Д. С., Чураков П. П. [и др.]. Поиск закономерностей на ЭЭС при симуляции тревожно-фобической ситуации в среде виртуальной реальности // *Информационно-управляющие системы*. 2022. № 4. С. 58–67.
14. Slater M., Wilbur S. A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. Vol. 6. P. 603–616.
15. Bowman D. A., McMahan R. P. Virtual reality: How much immersion is enough? // *Computer*. 2007. Vol. 40. P. 36–43.
16. Lécuyer A., Burkhardt J. M., Henaff J. M. Adaptive control for force-feedback rendering in haptic virtual environments: State of the art and research challenges // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2008. Vol. 17. P. 593–615.

References

1. Wood E., O'Brien A., Hall J. Effectiveness of Virtual Reality Training for Language Skills in Children with Autism. *Neuropsychologia*. 2013;39(11):1395–1396.
2. Hartley J., Heath J., Miller L. Emotion Regulation Through Virtual Reality: A Review of Research. *Current Directions in Psychological Science*. 2016;15(6):385–392.
3. Cohen S., Schoenfield D., Stern N. Interactive Visualization as a Tool for Teaching Language Skills in Children with Autism. *Current Biology*. 2014;19(10):9419–9422.
4. Stein A. et al. The Effects of Video Games on Social Skills in Children with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. 2017;20(4):741–754.

5. Birnie C., Bolton S., Wright S. The Effects of Virtual Reality on Experiential Learning in Children with Autism: A Meta-Analytic Review. *British Journal of Educational Psychology*. 2018;90(4):867–879.
6. Bofanova N.S., Tychkov A.Yu., Dyatlov A.V. et al. Virtual reality technology as a promising direction in the treatment of postoperative and post-traumatic pain. *Rossiyskiy zhurnal boli = The Russian Journal of Pain*. 2022;20(2):68–72.
7. Bates K., Rosenberg A., McClintock M. Multi-Tasking in the Virtual Environment: Implications for the Development of Emotional Intelligence. *Journal of Consciousness Studies*. 2011;5(2):173–183.
8. Ivanov A.D. Adaptive virtual reality system using a neural interface. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2023;(2):121–126. (In Russ.)
9. Levin D., Kohn M., Rose J. Using Virtual Reality to Improve Motor Skills in Children with Autism. *Current Biology*. 2014;19(10):9390–9400.
10. Wright S., Birnie C., Mitchell P. Effects of Virtual Reality on Learning and Memory in Adolescents with Autism: A Systematic Review and Meta-Analysis. *British Journal of Educational Psychology*. 2020;98(2):305–312.
11. Bailey C. et al. Virtual Reality Training for Motor Skills in Children with Autism. *Pediatrics*. 2015;129(1):67–76.
12. Darken R.P., Peterson B. Spatial orientation, wayfinding, and representation. In *Handbook of virtual environments*. 2002:493–517.
13. Tychkov A.Yu., Chernyshov D.S., Churakov P.P. et al. Search for patterns in the EES when simulating an anxiety-phobic situation in a virtual reality environment. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*. 2022;(4):58–67. (In Russ.)
14. Slater M., Wilbur S. A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997;6:603–616.
15. Bowman D.A., McMahan R.P. Virtual reality: How much immersion is enough? *Computer*. 2007;40:36–43.
16. Lécuyer A., Burkhardt J.M., Henaff J.M. Adaptive control for force-feedback rendering in haptic virtual environments: State of the art and research challenges. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2008;17:593–615.

Информация об авторах / Information about the authors

Алан Казанферович Алимуратов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: 4alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

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

Денис Сергеевич Чернышов

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: deniska_1980_13@mail.ru

Denis S. Chernyshov

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

Оксана Сергеевна Симакова

кандидат педагогических наук,
начальник Управления комплексного развития
инклюзивного образования,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: zcsio@mail.ru

Oksana S. Simakova

Candidate of pedagogical sciences,
head of the department for integrated
development of inclusive education,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анна Николаевна Тычкова

начальник отдела координации научных
мероприятий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkova-anna@mail.ru

Anna N. Tychkova

Head of scientific events coordination department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Леонидович Овчинников

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dmitry_ovch@mail.ru

Dmitry L. Ovchinnikov

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 26.02.2024

Поступила после рецензирования/Revised 15.03.2024

Принята к публикации/Accepted 18.04.2024

УДК 612.216.3, 681.518.5
doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-9

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В КОМПЛЕКСАХ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЫХАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ

Н. В. Ивахно¹, С. И. Зыкин²

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Научно-производственное объединение «Стрела», Тула, Россия

¹ natalia_iv@list.ru, ² zikin.s.i@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются методы построения информационно-управляющего комплекса, воздействующего на дыхательную систему человека. Такие системы используются во всем мире для реабилитации, лечения и профилактики пациентов с хронической обструктивной болезнью легких и сердечной недостаточностью. Двухконтурный метод управления, основанный на системе принятия решений, построенной с использованием нечеткой логики, позволяет осуществлять адаптивную нагрузку на дыхательную мускулатуру на основе получаемой информации в реальном масштабе времени. *Материалы и методы.* В работе использованы методы системного анализа, нечеткой логики, теории аппроксимации. *Результаты.* В ходе проведенного исследования получена структурная схема информационно-управляющего комплекса, включающая в свой состав блок определения уровня тренированности человека и систему поддержки принятия решений. Реализован метод тестирования состояния дыхательной системы человека и алгоритм оценки уровня приближения дыхательной системы к группе «норма» и «патология». *Выводы.* Предложенные методы и средства позволяют обеспечить настраиваемый уровень нагрузки на дыхательную систему каждого пациента с учетом изменений с течением времени.

Ключевые слова: блок управления, автоматическая регулировка, система поддержки принятия решений, параметры дыхания

Для цитирования: Ивахно Н. В., Зыкин С. И. Методы и технические средства автоматического управления в комплексах корректирующего воздействия на дыхательную систему // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 73–80. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-9

METHODS AND TECHNICAL MEANS OF AUTOMATIC CONTROL IN COMPLEXES OF CORRECTIVE EFFECTS ON THE RESPIRATORY SYSTEM

N.V. Ivakhno¹, S.I. Zikin²

¹ Tula State University, Tula, Russia

² Scientific and Production Association "Strela", Tula, Russia

¹ natalia_iv@list.ru, ² zikin.s.i@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper considers the methods of building an information and control complex that affects the human respiratory system. Such systems are used worldwide for the rehabilitation, treatment and prevention of patients with chronic obstructive pulmonary disease and heart failure. A two-circuit control method based on a decision-making system built using fuzzy logic allows for adaptive load on the respiratory muscles based on the information received in real time. *Materials and methods.* The methods of system analysis, fuzzy logic, and approximation theory are used in the work. *Results.* In the course of the conducted research, a block diagram of the information management complex was obtained, which includes a block for determining the level of human fitness and a decision support system. A method for testing the state of the human respiratory system and an algorithm for assessing the level of approximation of the respiratory system to the «norm» and «pathology» groups have been implemented. *Conclusions.* The proposed methods and tools make it possible to provide a configurable level of stress on the respiratory system of each patient, taking into account changes over time.

Keywords: control unit, automatic adjustment, decision support system, breathing parameters

For citation: Ivakhno N.V., Zikin S.I. Methods and technical means of automatic control in complexes of corrective effects on the respiratory system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2024;(2):73–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-9

Введение

Актуальность задачи определяется увеличением количества заболеваний, связанных с хроническими обструктивными болезнями легких (ХОБЛ) и сердечно-сосудистыми заболеваниями. Особого внимания требуют к себе пациенты с осложненными формами протекания болезни. Одним из возможных решений могут стать тренировки дыхательной мускулатуры с использованием специализированных дыхательных тренажеров, которые показали хорошие результаты и вошли в список национальных рекомендаций по лечению пациентов с ХОБЛ и сердечной недостаточностью [1–3]. Теоретической и практической проработкой данной тематики занимались Е. А. Колесникова, А. А. Хадарцев, И. М. Белоусова, Jean Crowe, Reid WD [4, 5].

Анализ дыхательных тренажеров, таких как Threshold IMT, POWERbreathe K3, Plasti-Med, показал, что в перечисленных моделях используется несколько уровней нагрузки на дыхательную систему, но ее выбор осуществляется пользователем. Производители тренажеров рекомендуют начинать с самого низкого уровня нагрузки и предупреждают, что выбор другого уровня сопротивления может привести к снижению эффективности тренировок и негативно отразиться на состоянии человека [5].

В данный момент отсутствуют дыхательные тренажеры с автоматическим выбором и адаптацией уровня нагрузки, учитывающие параметры дыхательной мускулатуры. Актуальным является разработка новых методов и алгоритмов, позволяющих создать управляющую систему, оказывающую дозированную нагрузку на дыхательную мускулатуру на основе получаемой информации в реальном масштабе времени.

Материалы и методы

При проектировании систем медицинского назначения основой функционирования является контроль за изменением состояния пациента. Поэтому информационно-управляющий комплекс (ИУК), воздействующий на дыхательную систему человека, строится с использованием гибридной схемы, включающей в себя систему поддержки принятия решений (рис. 1).



Рис. 1. Структура информационно-управляющего комплекса, воздействующего на дыхательную систему человека

В тестовом режиме в результате параметрического анализа данных, полученных в результате нагрузочных тестов, составляется диагностическая матрица M , на основании которой определяется показатель тренированности человека.

Значения диагностической матрицы определяются при проведении нагрузочных тестов, которые соответствуют дыханию с перекрытием заслонки от 0 до 80 % с шагом в 20 %. Уровни перекрытия дыхательного контура обозначены индексом $i = 0, 1 \dots 4$. Реакция испытуемого на увеличение сопротивления в дыхательном контуре отражается изменением показателей матрицы, полученных при анализе графиков давления (рис. 2) и данных с датчиков дыхательных усилий.

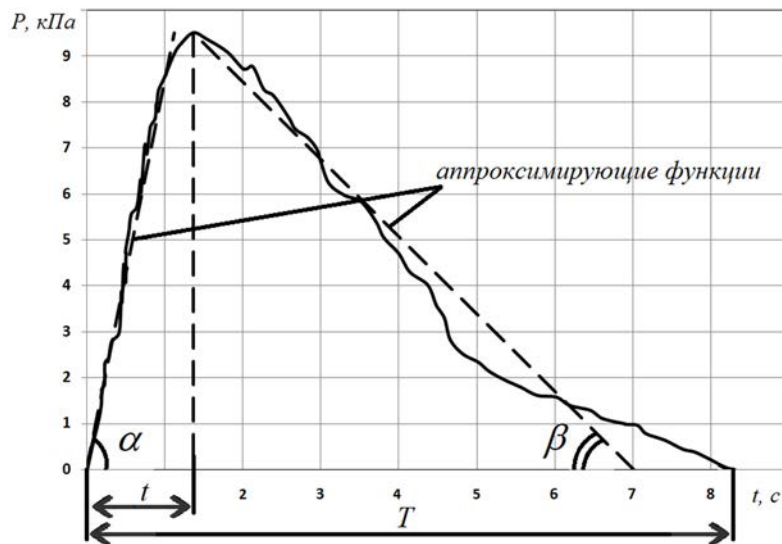


Рис. 2. График давления в дыхательном контуре с аппроксимирующими линейными функциями

Проведен параметрический анализ графиков давления, полученных в ходе нагрузочных тестов, в результате выделены параметры: угол наклона аппроксимирующей функции α , время нарастания кривой давления до максимума t , длительность фазы вдоха дыхания T . На основании данных, полученных с датчиков дыхательных усилий грудной клетки, рассчитывается среднее изменение окружности грудной клетки C и среднее изменение окружности диафрагмы A . Оценивается отношение глубины грудного и диафрагмального дыхания. Тренированные испытуемые склонны к брюшному типу дыхания и при оказании нагрузки естественной реакцией организма является увеличение глубины дыхания. У нетренированных пациентов и пациентов с патологией наблюдается склонность к грудному дыханию и реакцией на нагрузку является увеличение частоты дыхания [9]:

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_0 & t_0 & T_0 & C_0 & A_0 \\ \alpha_1 & t_1 & T_1 & C_1 & A_1 \\ \alpha_2 & t_2 & T_2 & C_2 & A_2 \\ \alpha_3 & t_3 & T_3 & C_3 & A_3 \\ \alpha_4 & t_4 & T_4 & C_4 & A_4 \end{bmatrix}.$$

Получена обобщенная формула для расчета коэффициентов k_α , k_t , k_T , k_C , k_A , характеризующих реакцию дыхательной системы на оказание нагрузки по каждому из параметров:

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^5 \sqrt{\frac{(M_{im} - M_{i^*m})^2}{M_{0m}^2}}}{5},$$

где $i^* = i + 1$.

Совокупный коэффициент реакции испытуемого отражает уровень тренированности дыхательной системы и рассчитывается по формуле

$$K_{\text{сов}} = \sum_{j=1}^5 b_j k_j,$$

где b_j – весовой коэффициент каждого параметра.

Совокупный коэффициент реакции отражает ответ дыхательной системы испытуемого на различные уровни сопротивления в дыхательном контуре. Основываясь на данном показателе, выбирается начальная нагрузка на дыхательную мускулатуру [6].

При работе информационно-управляющего комплекса используется блок поддержки принятия решений, основной задачей которого является определение динамики реабилитации человека или повышение тренированности дыхательной системы. В ходе работы рассмотрены и проанализированы данные двух групп испытуемых «норма», «патология». При этом совокупность текущих признаков, характеризующих его состояние, объединяется в группу ω , Ω_n – класс испытуемых «норма»; Ω_d – класс испытуемых «патология».

Алгоритм распознавания основывается на сравнении той или другой меры близости или меры сходства распознавания объекта с каждым классом Ω_g .

В идеальной ситуации мера близости $L(\omega, \Omega_g)$ должна равняться нулю с одним из приведенных классов, что будет свидетельствовать о полном совпадении признаков исследуемого объекта. На практике такие ситуации практически отсутствуют из-за постоянной дисперсии значения признаков. Выводы о принадлежности пациента к одной из групп делаются на основании нахождения наименьшего значения меры близости $L(\omega, \Omega_g)$ одной из групп.

Развитие новой элементной базы позволяет использовать в ИУК автоматическую регулировку сопротивления, но остро встает вопрос о степени воздействия на дыхательную систему. Важно правильно выбрать уровень нагрузки, подобрав такие значения, при которых обеспечивается необходимое корректирующее воздействие и не происходит переутомление, ведущее к негативным эффектам. Однако взаимосвязь между показателями организма и оказываемой нагрузкой заранее неизвестна и носит нелинейный характер. В данной ситуации целесообразно применять методы нечеткого логического вывода, что позволяет существенно упростить решаемую задачу.

Решение данной задачи основано на использовании лингвистического описания состояния дыхательной системы. Логическое устройство по определению уровня нагрузки реализовано в виде логико-лингвистической модели. Нечеткое логическое устройство характеризуется множеством входных и одним выходным параметром (рис. 3).

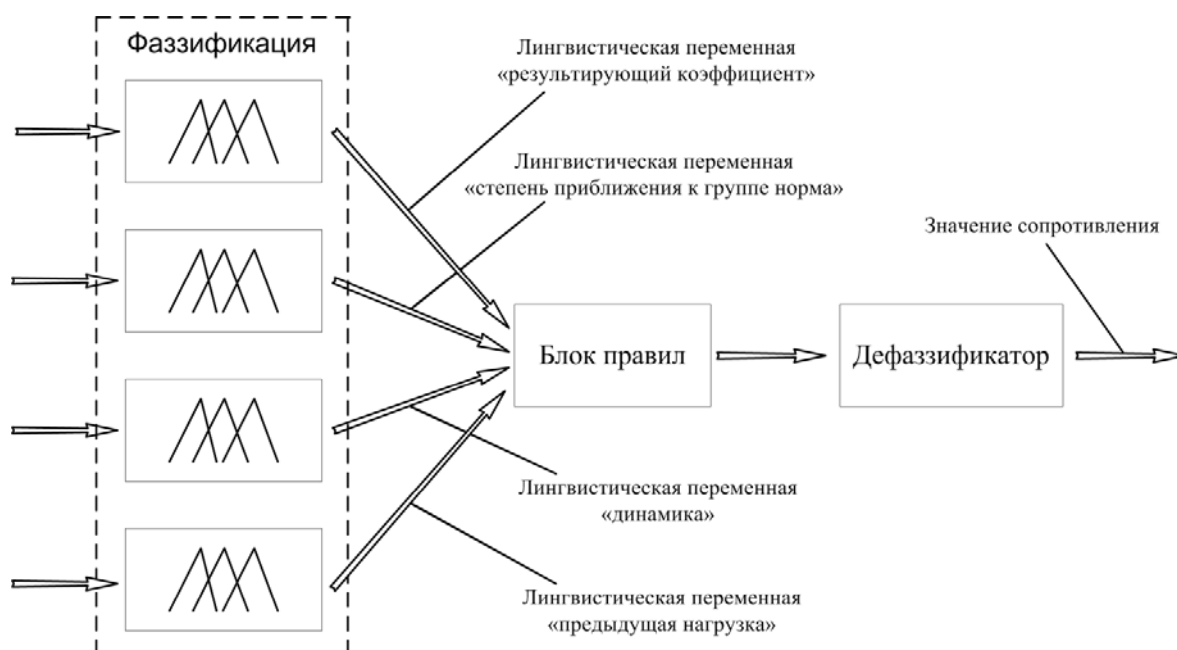


Рис. 3. Структурная схема нечеткого логического устройства определения уровня нагрузки

Входные параметры – совокупный коэффициент $K_{\text{сов}}$ и степень приближения пациента к группе «норма» L_n – используются для диагностики актуального состояния дыхательной системы. Параметр динамика D отражает изменение состояния показателей дыхательной системы пользователя за последние тренировки. Показатель предыдущая нагрузка R_{past} хранит в себе значения сопротивления, используемые в прошлых тренировках.

На этапе фазификации входы и выход модели рассмотрим как лингвистические переменные [7], значения которых определяются из терм-множеств. Входные $K_{\text{сов}}$, L_n , D , R_{past} и выходной параметр R_{sel} принимают следующие лингвистические значения: {«LOW» – низкий показатель, «MEDIUM» – средний показатель, «HIGH» – высокий показатель}.

Теперь для каждой переменной определим терм-множество (рис. 4).

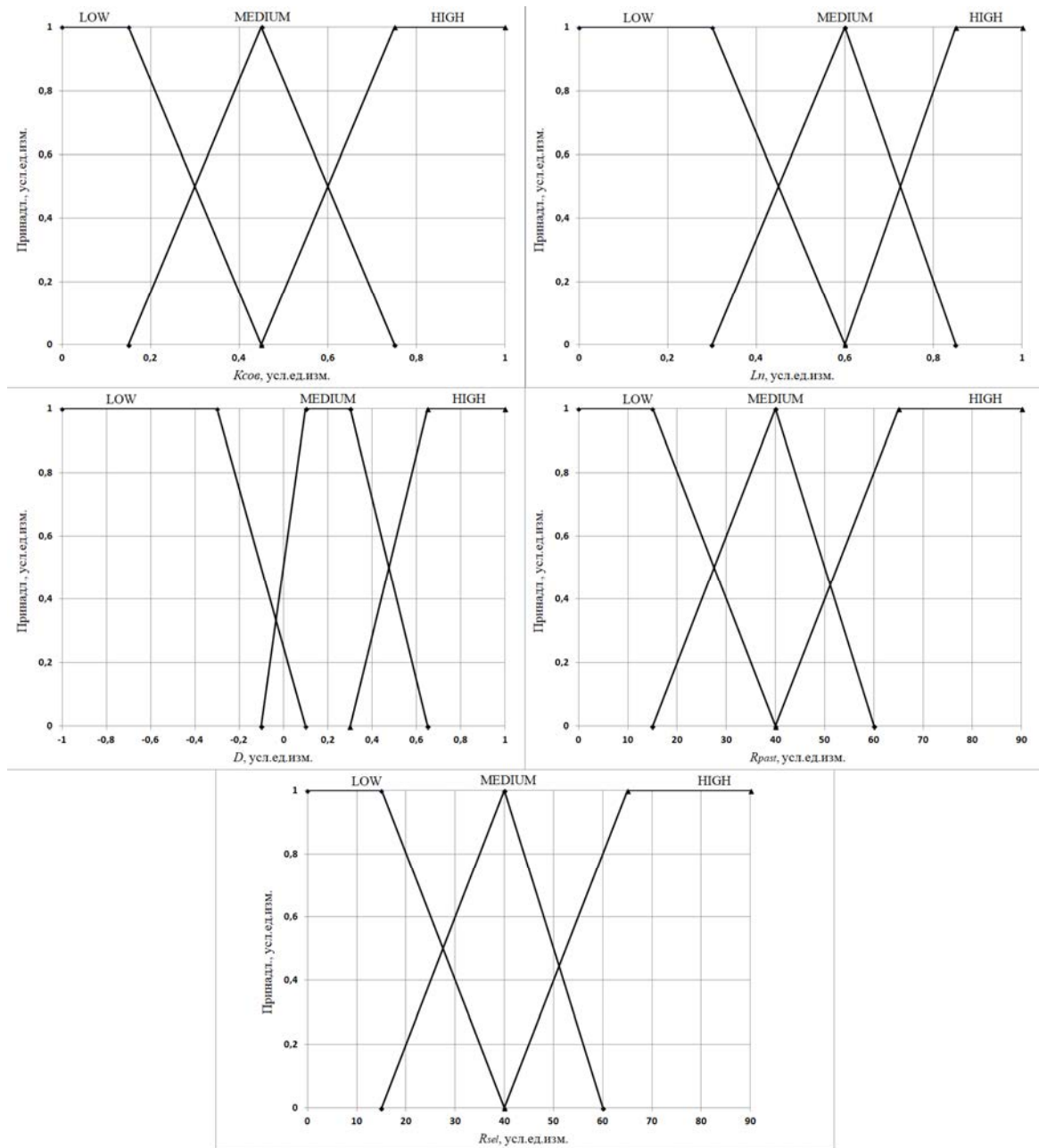


Рис. 4. Оптимальные функции принадлежности нечеткой модели типа Мамдани

В функциях принадлежности применялись следующие формы кривых:

- треугольная функция, определяемая тройкой чисел (a, b, c) и значением в точке x ;
- трапецидальная функция, определяемая четырьмя величинами (a, b, c, d) и значением в точке x .

В качестве выходной переменной используется переменная R_{sel} , полученная в результате обработки лингвистических переменных блоком лингвистических правил. Множество лингвистических правил задается на основании научных трудов экспертов, моделирования работы системы и экспериментальных исследований:

1. if (K_{cov} is LOW) and (L_n is LOW) then (R_{sel} is LOW), weight: 1
2. if (K_{cov} is MEDIUM) and (L_n is LOW) then (R_{sel} is LOW), weight: 1
3. if (K_{cov} is LOW) and (L_n is MEDIUM) then (R_{sel} is LOW), weight: 1
4. if (K_{cov} is MEDIUM) and (L_n is MEDIUM) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 1
5. if (K_{cov} is HIGH) and (L_n is MEDIUM) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 1
6. if (K_{cov} is MEDIUM) and (L_n is HIGH) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 1
7. if (K_{cov} is HIGH) and (L_n is HIGH) then (R_{sel} is HIGH), weight: 1
8. if (R_{past} is LOW) and (D is LOW) then (R_{sel} is LOW), weight: 0.7
9. if (R_{past} is LOW) and (D is MEDIUM) then (R_{sel} is LOW), weight: 0.85
10. if (R_{past} is LOW) and (D is HIGH) then (R_{sel} is LOW), weight: 1
11. if (R_{past} is MEDIUM) and (D is LOW) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 0.7
12. if (R_{past} is MEDIUM) and (D is MEDIUM) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 0.85
13. if (R_{past} is MEDIUM) and (D is HIGH) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 1
14. if (R_{past} is HIGH) and (D is LOW) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 0.7
15. if (R_{past} is HIGH) and (D is MEDIUM) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 0.85
16. if (R_{past} is HIGH) and (D is HIGH) then (R_{sel} is MEDIUM), weight: 1

Заключение

Параметры D , R_{past} используются в лингвистических правилах для оказания последовательной нагрузки на организм. Динамика состояния напрямую влияет на степень истинности высказывания. В случаях, когда за последние тренировки D положительная, можно утверждать, что нагрузку во время тренировки уменьшать не следует и уменьшение одного из показателей L_n , K_{cov} считается временным отклонением.

Идентификация с помощью нечеткого логического вывода является эффективным методом построения модели нелинейной зависимости выбора нагрузки, обеспечивающей взаимосвязь между показателями организма и оказываемой нагрузкой.

Анализ научно-методических работ по оценке эффективности воздействия ИУК выявил, что уровень оказываемой нагрузки является основным фактором формирования ответной реакции дыхательной системы при тренировке [9–11]. Для реализации работы структурной схемы спроектирована конструкция дыхательной заслонки, отвечающая предъявляемым требованиям работы ИУК, описанная в патенте на изобретение [8].

Предложена новая структурная схема ИУК, реализующая автоматический выбор нагрузки на дыхательную систему с блоком поддержки принятия решений, отслеживающая динамику приближения дыхательной системы к группе пациентов «норма» и «патология».

Список литературы

1. Beaumont M., Forget P., Couturaud F. Effects of inspiratory muscle training in COPD patients: A systematic review and meta-analysis // Clin Respir J. 2018. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29665262/>
2. Piepoli M. F., Conraads V., Corrà U. [et al]. Exercise training in heart failure: from theory to practice. A consensus document of the Heart Failure Association and the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation // European Journal of Heart Failure. 2011. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21436360/>
3. Smart N. A., Giallauria F., Dieberg G. Efficacy of inspiratory muscle training in chronic heart failure patients: A systematic review and metaanalysis // International Journal of Cardiology. 2013. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22560934/>

4. Арутюнов А. Г., Колесникова Е. А., Ильина К. В. [и др] Выбор оптимального режима тренировок дыхательных мышц у пациентов с хронической сердечной недостаточностью II–III функциональных классов // Кардиология. 2021. Т. 61, № 2. С. 69–75. doi: 10.18087/cardio.2021.2.n1356
5. Гриппи М. А. Патофизиология легких. М. : Бином, 2001. 304 с.
6. Зыкин С. И., Ивахно Н. В., Анцибор С. В. Математическая модель выбора начального сопротивления в дыхательном контуре в основании данных диагностической матрицы состояния // Известия Института инженерной физики. 2019. № 2 (52). С. 2–6.
7. Кубланов В.С., Борисов В.И., Долганов А.Ю. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 120 с.
8. Патент 2737935 Российская Федерация. Дыхательный тренажер / Зыкин С. И., Ивахно Н. В. № 2020121896 ; заявл. 26.06.2020 ; опубл. 07.12.2020, Бюл. № 34.
9. Соколенко В. Н., Веснина Л. Э., Жукова М. Ю. [и др]. Физиология системы дыхания. Модуль 2. Физиология висцеральных систем. Полтава, 2018. 29 с.
10. Щукин С. И., Ершов Ю. А. Биотехнические системы медицинского назначения : учебник : в 2 ч. Ч. 2. Анализ и синтез систем. М. : Юрайт, 2017. 348 с.
11. Ямборко П. В. Изменение физической работоспособности и функциональных резервов организма при резистивных инспираторно-экспираторных нагрузках : автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 24.00.01. Ульяновск, 2005. 15 с.

References

1. Beaumont M., Forget P., Couturaud F. Effects of inspiratory muscle training in COPD patients: A systematic review and meta-analysis. *Clin Respir J*. 2018. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29665262/>
2. Piepoli M.F., Conraads V., Corrà U. et al. Exercise training in heart failure: from theory to practice. A consensus document of the Heart Failure Association and the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation. *European Journal of Heart Failure*. 2011. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21436360/>
3. Smart N.A., Giallauria F., Dieberg G. Efficacy of inspiratory muscle training in chronic heart failure patients: A systematic review and metaanalysis. *International Journal of Cardiology*. 2013. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22560934/>
4. Arutyunov A.G., Kolesnikova E.A., Il'ina K.V. et al. Choosing the optimal training regime for respiratory muscles in patients with chronic heart failure of II–III functional classes. *Kardiologiya = Cardiology*. 2021;61(2):69–75. (In Russ.). doi: 10.18087/cardio.2021.2.n1356
5. Grippi M.A. *Patofiziologiya legkikh = Pathophysiology of the lungs*. Moscow: Binom, 2001:304. (In Russ.)
6. Zykin S.I., Ivakhno N.V., Antsibor S.V. A mathematical model for choosing the initial resistance in the respiratory circuit based on the data of the diagnostic state matrix. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*. 2019;(2):2–6. (In Russ.)
7. Kublanov V.S., Borisov V.I., Dolganov A.Yu. *Analiz biomeditsinskikh signalov v srede MATLAB = Analysis of biomedical signals in the MATLAB environment*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016:120. (In Russ.)
8. Patent 2737935 Russian Federation. *Dykhatel'nyy trenazher = Breathing simulator*. Zykin S.I., Ivakhno N.V. № 2020121896; appl. 26.06.2020; publ. 07.12.2020, Bull. № 34. (In Russ.)
9. Sokolenko V.N., Vesnina L.E., Zhukova M.Yu. et al. *Fiziologiya sistemy dykhaniya. Modul' 2. Fiziologiya vistseral'nykh sistem = Physiology of the respiratory system. Module 2. Physiology of visceral systems*. Poltava, 2018:29. (In Russ.)
10. Shchukin S.I., Ershov Yu.A. *Biotehnicheskie sistemy meditsinskogo naznacheniya: uchebnik: v 2 ch. Ch. 2. Analiz i sintez sistem*. Moscow: Yurayt, 2017:348. (In Russ.)
11. Yamborko P.V. *Changes in physical performance and functional reserves of the body under resistive inspiratory and expiratory loads*. DSc abstract: 24.00.01. Ul'yanovsk, 2005:15. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Валериевна Ивахно

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры газовой динамики,
Тульский государственный университет
(Россия, г.Тула, пр-т Ленина, 92)
E-mail: natalia_iv@list.ru

Natalia V. Ivakhno

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of gas dynamics,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Сергей Игоревич Зыкин

инженер,

Научно-производственное объединение «Стрела»

(Россия, г. Тула, ул. М. Горького, 6)

E-mail: zyk.in.s.i@yandex.ru

Sergey I. Zikin

Engineer,

Scientific and Production Association "Strela"

(6 M. Gorky street, Tula, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 12.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.04.2024

Принята к публикации/Accepted 06.05.2024