

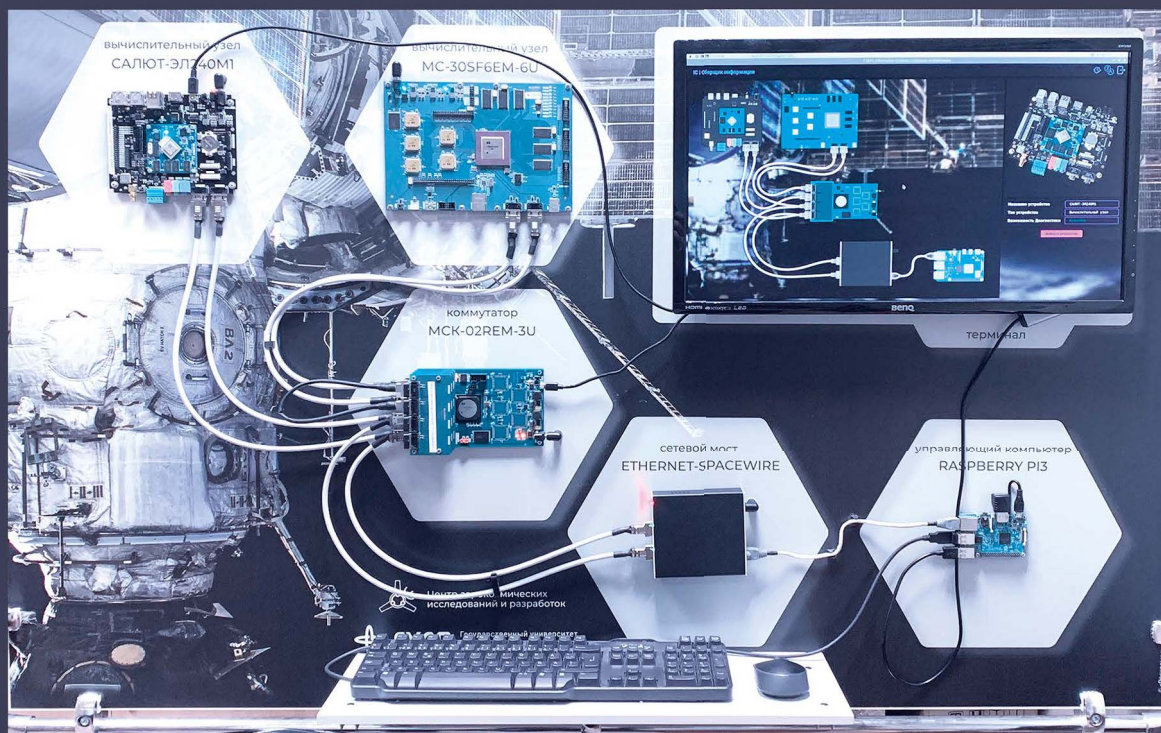
ISSN 2949-0693

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 4 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION





ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 3, № 4 • 2024

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 3, no. 4 • 2024



SUAI

Saint Petersburg
State University
of Aerospace
Instrumentation

Innovative Instrumentation

Founded in 2022

Founder

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Publisher

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Chief Editor

E. A. Frolova,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Director at the Institute of Fundamental
Training and Technological Innovation,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Executive Secretary

V. A. Tushavin,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor

Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.
V. A. Tushavin, D. Sc., Assoc. Prof.
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Media (Roskomnadzor),
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion
materials; its content does not necessarily reflect
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal
"Innovative Instrumentation" to foreign editions
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"
is mandatory.

Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation
Tel.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Website: <https://guap.ru/inps>

Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. I. Shevchenko, D. Sc.
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor *V. A. Chernikova*

Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 28.08.2024. Signed for printing: 30.08.2024. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Главный редактор

Е. А. Фролова,
доктор технических наук, доцент,
директор института фундаментальной
подготовки и технологических инноваций,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,
кандидат технических наук, доцент

Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,
доктор технических наук, доцент

Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.
В. А. Тушавин, д-р техн. наук, доц.
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496
от 24.06.2022 – печатное издание)

Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных
материалов; его содержание не обязательно
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное
приборостроение» в зарубежные издания допускается
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»
обязательна.

Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
Тел.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guar.ru
Сайт: <https://guar.ru/inps>

Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*

Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 28.08.2024. Дата выхода в свет: 30.08.2024. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 11,2. Усл. печ. л. 10,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 279.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

Анализ и оценка ключевых конструктивных особенностей, определяющих качество электрических контрольно-измерительных приборов

Алексей Павлович Бобрышов¹

✉ ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-код: 2630-5787, Author ID: 1126665

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-код: 3957-5891, Author ID: 910148

Владимир Павлович Кузьменко¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-код: 3159-4202, Author ID: 1111872

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Параметр качества характеризуется способностью изделия выполнять в полном объеме и достаточной степени заявленные паспортными функциями. Для электрических контрольно-измерительных приборов оценочным параметром, описывающим, насколько качественно устройство выполняет свои функции, является точность. Данное значение зависит от многих факторов, в различной степени оказывающих воздействие на измерительное устройство. Учитывая разновидность конструкций приборов, особенности и различную степень уязвимости конструктивных узлов, можно сделать вывод, что снижение такого параметра, как точность прибора, у разных устройств будет, соответственно, разная, даже при одинаковых внешних условиях эксплуатации. Цель исследования заключается в осуществлении подробного анализа конструкций электрических контрольно-измерительных приборов для выявления наиболее чувствительных конструктивных элементов, учет особенностей и специфики износа которых позволит сформировать модели, описывающие динамику изменения точности электрического прибора.

Ключевые слова: контрольно-измерительные приборы, измерительные приборы, измерительные устройства, точность, погрешность, качество изделий, надежность узлов, аналого-цифровой преобразователь

Для цитирования: Бобрышов А. П., Солёный С. В., Кузьменко В. П. Анализ и оценка ключевых конструктивных особенностей, определяющих качество электрических контрольно-измерительных приборов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 5–13. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-3-4-5-13.

Original article

Analysis and evaluation of key design features that determine the quality of electrical test and measurement instruments

Aleksey P. Bobryshov¹

✉ ap.bobryshov@mail.ru, orcid.org/0009-0009-6220-8206, SPIN-code: 2630-5787, Author ID: 1126665

Sergey V. Solony¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890, SPIN-code: 3957-5891, Author ID: 910148

Vladimir P. Kuzmenko¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875, SPIN-код: 3159-4202, Author ID: 1111872

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The quality parameter is characterized by the ability of the product to perform fully and sufficiently the functions declared in the data sheet. In the context of electrical measuring and control devices, accuracy is an evaluation parameter describing how well the device performs its functionality. This value depends on many factors that affect the measuring device to varying degrees, and given the variety of device design, features and varying degrees of vulnerability of structural units, we can conclude that the reduction of such a parameter as the accuracy of the device in different devices will be correspondingly different, even under the same external operating conditions. The purpose of this study is to carry out a detailed analysis of the design of electrical test and measurement devices to identify the most sensitive structural elements, considering the peculiarities and specificity of wear which will allow to form models describing the dynamics of changes in the accuracy of electrical devices.

Keywords: control and measuring instruments, measuring instruments, measuring devices, accuracy, error, product quality, reliability of assemblies, analog-to-digital converter

For citation: Bobryshov A. P., Solony S. V., Kuzmenko V. P. Analysis and evaluation of key design features that determine the quality of electrical test and measurement instruments. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):5–13. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-5-13.

Введение

Согласно ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения», качество продукции характеризуется пригодностью изделия удовлетворять установленные потребности. Для случая сложных изделий, состоящих из нескольких отдельных узлов, параметр качества будет определяться средним общим значением от свойств отдельных элементов. Описанные свойства оцениваются, в том числе, количественно, при этом номенклатура показателей качества продукции зависит от назначения описываемого объекта: например, для электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) главным оценочным значением является точность измерительного устройства (ИУ) [1]. Поскольку измерительные приборы (ИП) являются сборной конструкцией, на описываемое значение влияют множество параметров, оказывающих прямое воздействие на работу устройства: разновидность типа электрического тока, фиксируемая величина, конструкция, принцип работы и т. п. Данные параметры определяют внушительный список характеристик, влияющих на качество электрического КИП. Не стоит забывать и о внешних воздействиях, устанавливающих определенные условия эксплуатации ИУ, начиная от номиналов отображаемой электрической величины и заканчивая такими условиями, как температурный и частотный диапазоны, влажность, степень загрязненности и т. п. Такие же требования устанавливаются при проведении мероприятий поверки и калибровки, что определяет качество измерений и проведения аттестационных мероприятий [2].

Согласно приказу Росстандарта № 1502 «Об утверждении рекомендуемых предельных значений интервалов между поверками средств измерений», большому перечню ИП электрических и магнитных величин предписано проведение плановой поверки после одного года эксплуатации [3]. Согласно списку, интервал периодической поверки в течение одного года охватывает наиболее распространенные в эксплуатации электрические КИП классами точности ориентировочно от единицы и выше. Такие устройства чаще используют на объектах или в системах, где степень погрешности измерений может быть в достаточной мере большой с точки зрения метрологии, а измеряемые величины могут отклоняться в широком диапазоне за единицу времени. Не стоит забывать про износ материалов самого прибора, разрушение изоляции и т. п. Подразумевается, что при эксплуатации электроизмерительных КИП в течение одного года даже в условиях, не

всегда соответствующих номинальным, точность прибора не выйдет за установленное паспортное значение отклонения, несмотря на всевозможные нелинейности в условиях эксплуатации и измерений. При этом для других ИУ межповерочный интервал может составлять от 2 лет до 16 лет, как, например, в счетчиках электрической энергии или встроенном измерительном трансформаторе тока. Приведенные интервалы поверки выбраны с учетом износа материала и потенциальных условий эксплуатации прибора, при этом в приказе и многочисленных стандартах правил и норм поверки отсутствует разделение времени для цифровых и аналоговых-стрелочных ИУ, что недопустимо по причине разной степени надежности ввиду отличий конструкций и физики работы таких устройств. Также приведенные межповерочные интервалы являются в большей степени усредненными, подразумевающими эксплуатацию КИП в установленных паспортом номиналах, что не всегда является реализуемым. Ярким примером является нелинейность сети электропитания, влияющая в достаточной мере на работу ИП [3, 4]. Отсюда вытекает дополнительное упущение с точки зрения проведения настройки прибора, поскольку сложно оценить, за какой период времени точность прибора выйдет за установленные паспортные рамки. Это может произойти в течение очередного года эксплуатации, при этом сложно установить, в какой именно момент времени это произошло.

Для оптимизации и обеспечения наиболее эффективного контроля качества как электрических КИП, так и измерений, устанавливается необходимость проведения дополнительных научно-практических исследований в области оценки динамики изменения точности электрических ИУ. Перед составлением систем и моделей анализа необходимо установить наиболее уязвимые и чувствительные узлы различных типов электрических приборов. Для анализа возможно использовать практические данные и результаты поверки отдельных электрических КИП за период от начала эксплуатации до выхода точности за установленные паспортные номиналы, что, по средним оценкам, при условии принятия оцениваемого ИУ, изначально как отвечающего установленным нормам качества прибора, может составлять от трех лет работы устройства или после одного года эксплуатации. При этом стоит помнить, что для протокола оценки точности, в зависимости от применяемых методов оценки, фиксируется различное количество измерений. Оптимальным минимумом с точки зрения разметки шкалы прибора наиболее часто принимается пять точек измерений. Согласно стандартам

при статистической оценке и критериям Граббса или Кохрена, количество измерений может все составлять от четырех, а для цифровых приборов наиболее часто принимается минимум 12 значений [5, 6]. Для оценки результата точности, при условии дополнительного применения методик оценки, описанного объема выборки может быть достаточно, но со статистической точки зрения, учитывая оценку минимально возможного числа параметров, возможно проводить оценку с выборки из четырех измерений [7]. С точки зрения статистики для получения наиболее достоверных и качественных результатов необходимо использовать наборы количеством минимум от 25, в наиболее серьезных и подробных исследованиях количество значений исчисляется от 100 точек. Перед составлением системы для оценки динамики изменения точности изначально необходимо установить особенности конструкции и технологии фиксации электрических величин измерительными приборами.

В рамках данного исследования будут рассмотрены особенности таких электроизмерительных приборов, как амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, варметры, частотомеры и фазометры.

Особенности конструкции и принципа работы электрических КИП стрелочной системы

Стрелочные-аналоговые электроизмерительные приборы являются устройствами, отображающими измеряемую электрическую величину на заранее проградуированной шкале в результате физического взаимодействия, отклоняющего индикаторную стрелку под воздействием измеряемой величины. В целом определение стрелочных приборов имеет несколько интерпретаций, например: измерительный прибор, предназначенный для представления или индикации выходной информации в виде непрерывной функции измеряемой величины, или измерительный прибор, снабженный устройством для визуального отсчитывания значений измеряемой величины в любое время без регистрации значения этой величины и т. д. [6]. В зависимости от принципа работы механизма, ИП классифицируются на несколько типов, при этом отдельные типы могут разделяться на подтипы.

Электроизмерительные КИП магнитоэлектрической системы функционируют на основе магнитного взаимодействия. Основными подтипами таких устройств являются магнитоэлектрические приборы с подвижной рамкой и с под-

вижным магнитом, в большей степени не сильно отличающиеся друг от друга. ИУ с подвижной рамкой работает по принципу взаимодействия магнитного поля, генерируемого током в подвижной катушке с полем неподвижного магнита, при этом в приборе с подвижным магнитом, наоборот, подвижной является катушка с постоянными магнитами, а генерируемое магнитное поле находится в неподвижной катушке. КИП такой системы в большей степени используют для измерения переменного тока [8]. Несомненными плюсами таких устройств являются равномерная измерительная шкала, высокий показатель точности, а также минимальное влияние внешних магнитных полей на конструкцию и работу устройства. К недостаткам стоит отнести невозможность измерения переменного тока и высокую чувствительность к перегрузкам.

ИУ электромагнитной системы, как и магнитоэлектрической системы, функционируют на основе взаимодействия магнитных полей, создаваемых электрическим током в неподвижной катушке с подвижным ферромагнитным сердечником. Ключевым отличием таких устройств является работа по принципу втягивания сердечника, как соленоида в катушку прибора. Отдельно стоит отметить ИП поляризованной электромагнитной системы, использующие зазор в сердечнике катушки для отклонения индикаторной стрелки. Амперметры электромагнитной системы к конструкции используют малое количество витков катушки с более крупным сечением провода, при этом для вольтметров используются более тонкие провода с большим количеством витков [8]. Неоспоримыми достоинствами является то, что приборы данной системы можно использовать в цепях переменного и постоянного токов, а также стоит отметить надежность и устойчивость конструкции к перегрузкам сети. К недостаткам стоит отнести низкую точность, нелинейность шкалы, низкую чувствительность и в достаточной мере сильное влияние внешних магнитных полей на конструкцию ИП.

Электрические КИП электродинамической и ферродинамической систем отличаются от перечисленных выше приборов тем, что имеют в своей конструкции две катушки, генерирующие магнитные поля. ИП в своей конструкции имеют такие основные элементы, как подвижная и неподвижная катушки и спиральные пружины. Достоинствами таких приборов являются возможность использования в цепях постоянного и переменного токов и высокая точность. К недостаткам стоит отнести сравнительно низкую чувствительность, необходимость экранирования, ввиду значительного влияния внешних

электромагнитных полей, высокую мощность потребления энергии от источника и малую перегрузочную способность катушек. Стоит отметить ключевые отличия ферродинамической катушки, заключающиеся в наличии вспомогательного магнитопровода для замыкания магнитного потока, что позволяет повысить чувствительность прибора, снизить магнитное сопротивление, повысить вращательный момент механизма, уменьшить собственную потребляемую мощность и уменьшить влияние внешнего магнитного поля. На базе ферродинамической системы строятся амперметры, вольтметры, ваттметры и фазометры.

Индукционные электрические КИП работают через взаимодействие магнитных полей двух катушек тока и напряжения на общем магнитопроводе. Особенность работы такого прибора заключается во вращении алюминиевого диска путем наведения в нем вихревых токов Фуко, через взаимодействие генерируемых магнитных потоков, сдвинутых между собой по фазе. Тормозной демпфирующий момент создается через взаимодействие полей постоянного магнита и наводимых полей в диске. В случае наведения индукции с помощью стрелки момент создается пружиной. К достоинствам таких приборов стоит отнести возможность функционирования в режиме перегрузок и нечувствительность к внешнему магнитному полю. Недостатками такого КИП являются функционирование в определенной частоте сети с нечувствительностью к изменению данной частоты и работа исключительно на переменном токе, а также чувствительность к изменению внешней температуры.

ИП электростатической системы работают по принципу взаимодействия подвижных и неподвижных электродов, при прикладывании напряжения на обкладках которых возникает сила, увеличивающая емкость и приводящая электрод в движение. КИП данного типа различаются по форме подключаемых пластин, что влияет на момент, действующий на индикаторную стрелку для отображения измеряемой величины. Конструкция прибора электростатической системы включает в себя подвижные и неподвижные электроды-пластины, спиральную пружинку и стрелку. Достоинствами данных ИП являются высокое входное сопротивление, малая переменная входная емкость, малая мощность потребления энергии, широкий частотный диапазон, возможность измерения цепей постоянного и переменного токов. Среди явных недостатков стоит выделить малую чувствительность и невысокую точность, а также чувствительность к внешнему электромагнитному полю.

Электрические КИП логометрической системы являются особенными с точки зрения работы сравнения двух сил электрического тока в цепи катушек прибора. Логометры используют взаимодействие двух полей цепей, подключаемых к одному источнику. Две используемые в конструкции катушки имеют разное значение сопротивлений, что отражается на генерируемом магнитном поле, взаимодействие и уравнивание полученных моментов в поле постоянного магнита отражают главный принцип работы данной конструкции. Электрические приборы логометрической системы могут быть магнитоэлектрическими, электромагнитными, ферродинамическими и ферродинамическими. К достоинствам такой системы относятся отсутствие зависимости колебания напряжения питающей сети, высокие эксплуатационные параметры, возможность измерения постоянного и переменного токов. Недостатки – размагничивание постоянного магнита и чувствительность к влиянию внешнего электромагнитного поля, хотя в большей степени все зависит от типа основной системы КИП. Чаще всего логометры используют в качестве омметров.

ИУ вибрационной системы являются отдельным типом конструкции приборов, используемых в устройствах измерения частоты. Главный физический принцип работы заключается в упругом свойстве пластин из ферромагнитного материала различной длины резонировать под воздействием магнитного поля обмотки. Из описания принципа работы и измеряемой величины понятно, что данная система используется для измерения цепей переменного тока. Приборы данной системы устарели с точки зрения физики фиксации электрической величины, на сегодняшний день данная конструкция не востребована.

ИП тепловой системы работают по принципу изменения проводника в связи с влиянием температуры при протекании тока. Ключевой особенностью конструкции таких устройств является использование проволоки из сплава платины с иридием или серебром, закрепленной к пружинке через специальную нить. Нагрев обеспечивает удлинение проволоки, что приводит к ослаблению пружины и отклонению индикаторной стрелки. Основными достоинствами таких приборов являются измерение постоянного и переменного токов, полное исключение зависимости от частоты и формы переменного тока, а также отсутствие чувствительности к внешним электромагнитным полям. Главные недостатки – строгая зависимость от температуры внешней среды, тепловая инерция и неравномерность шкалы.

Отдельно стоит выделить аналоговые электронные электроизмерительные приборы, отличающиеся показателем точности. Несмотря на высокую точность систем многих стрелочных приборов, для измерения малых величин используется система усиления измеряемого параметра. На сегодняшний день наибольшее распространение получили магнитоэлектрические ИУ [8].

Также стоит упомянуть ИП вибрационной системы, работающие на принципе вибрации материала при определенной частоте. На сегодняшний день данные КИП не выпускаются по причине производства более современных и точных цифровых ИУ, но при этом большим спросом пользуются остальные типы аналоговых систем.

Особенности конструкции и принципа работы цифровых электрических КИП

Цифровые электроизмерительные приборы являются устройствами, отображающими фиксируемую электрическую величину путем преобразования непрерывной величины в цифровой код посредством использования вспомогательных систем обработки [9]. Принцип работы приборов такого рода заключается в кодировании и декодировании величины посредством использования цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифровых отсчетных устройств (ЦОУ). Данные КИП способны измерять различные величины – напряжение, ток, емкость, индукцию, частоту различного рода тока, как переменного, так и постоянного. Стоит отметить, что по конструктивному исполнению цифровые КИП разделяются на электромеханические и электронные, отличающиеся степенью точности и скоростью измерения величин. Особенность электронных приборов заключается в использовании современной базовой электроники, при этом принцип построения цифровых ИП отличается незначительно.

Также стоит отметить, что цифровые электрические КИП разделяются по типам АЦП на интегрирующий, последовательного приближения и параллельный. Каждый преобразователь отличается быстродействием и точностью. Интегрирующий АЦП производит усреднение входного сигнала по времени, время преобразования величины лежит в диапазоне от 0,001 до 50 с и выше, при этом обеспечивая наименьшую погрешность в 0,1–0,0003 %. Последовательный преобразователь отличается своим быстродействием – от 10 мкс до 1 мс. Параллельный АЦП является самым быстродействующим, но в то же время наименее точным. Таким образом, время

фиксации значения составляет 0,25 нс, а погрешность может составлять от 0,4 до 2 %.

Работа ИУ цифровой системы заключается в регистрации измеряемой величины как дискретной и конвертировании данных значений в цифровой код для дальнейшей обработки и отображения на циферблатах устройства. Один из цифровых приборов построен по принципу время-импульсного преобразования непрерывной величины во временном интервале с использованием интегрирующего АЦП. Устройством формируется промежуток времени, с высокой степенью точности пропорциональный измеряемой величине, число импульсов которого подсчитывается считывающим устройством. Короткие импульсы генерируются специальным аппаратом, период сигналов стабилизирован с высокой точностью [10]. Входная измеряемая величина поступает на вход с большим сопротивлением, обеспечивающим снижение данного показателя до безопасного уровня фиксации значений. После входного устройства устанавливается преобразовательный модуль, включающийся в случаях изменения рода обрабатываемого тока. Электрические КИП данной системы работают по принципу фиксации времени пропускания импульсов. Два устройства сравнения, работающие по принципу компаратора, формируют начальный и конечный сигналы для счета импульсов от генератора, после обрабатывая время согласно соответствующему интервалу. Конечный сигнал формируется после преувеличения измеряемого значения линейно-нарастающим сигналом от отдельного генератора.

Стоит отметить еще одну систему цифрового электрического КИП, построенного на наборе сравнивающих устройств – компараторов и генератора опорного напряжения. Такие ИП имеют так называемую погрешность квантования, обусловленную шагом преобразующего параллельного АЦП [11]. Набор компараторов подключается к драйверу цифрового считывающего устройства, количество входов которого обуславливает величину возможного отклонения. На один из входов компараторов подается сниженное значение фиксируемой величины, на другой вход, через установленные сопротивления, подводится опорное значение напряжения. Полученные показатели сравниваются и формируют логические «0» и «1», передающиеся на считывающий драйвер. Данное устройство фиксирует значения от компараторов с дальнейшим переводом полученных значений в двоичный код, соответствующий измеряемому значению электрического параметра.

Цифровые электрические КИП на последовательном АЦП отличаются от параллельных

тем, что на вход компаратора или операционного усилителя подается разное значение эталонных величин. В результате динамической подачи и изменения сигнала опорного напряжения осуществляется определение величины измеряемого параметра. На сегодняшний день в конструкции электрических КИП используются все типы пересчетных АЦП, отличающиеся исключительно по параметру точности.

Ключевые наиболее уязвимые к износу узлы электрических КИП и анализ причин, влияющих на изменение точности приборов

Проведя анализ существующих конструкций аналоговых электрических КИП, можно выделить общие наиболее уязвимые узлы. Практически во всех стрелочных ИП используется катушка для генерации магнитных полей, данный элемент является крайне чувствительным к перегрузкам в измеряемой сети, к тому же используемые медь и алюминий, как основа обмотки, при динамическом нагреве и охлаждении способны изменять свои электромагнитные свойства, при продолжительном изменении практически навсегда [12]. Все зависит от влияющей температуры внешней среды и образующейся температуры при протекании электрического тока через катушку, что подтверждается требованиями к внешним условиям эксплуатации. Многие аналоговые ИУ имеют в своей конструкции постоянный магнит, размагничивающийся в течение времени, что напрямую влияет на взаимодействие генерируемого поля обмоткой и поля магнита. Основные причины размагничивания относятся к более продолжительным процессам, например: сотрясения и удары, повышение температуры выше точки Кюри, длительное тепловое движение, помещение в переменное магнитное поле [13]. Используемые в подавляющем большинстве приборов спиральные пружины являются наиболее уязвимым узлом. Динамичное изменение измеряемой электрической величины способствует растяжению пружин, оказывая влияние на механические свойства последней, при этом также дополнительно изменяется температура, согласно закону Гука, что оказывает влияние на пружину, внося изменения в механизм КИП. Дополнительно стоит отметить, что именно повышенное значение напряжения и тока может сильно нагревать катушку, изменяя механические свойства материалов, в случаях повышенных значений данные элементы могут вовсе сгореть. Также не стоит забывать, что многие рассмотренные конструкции ИП об-

ладают чувствительностью к влиянию внешнего магнитного поля.

Проводя анализ принципа работы конструкции всех цифровых ИП, в качестве слабых узлов конструкции можно назвать АЦП, генератор сигналов, счетное устройство, внутренние сопротивления, компараторы и операционные усилители. Такие ИУ зависят от внешнего воздействия электромагнитного поля, особенно в случаях токовых клещей, и внешней температуры, изменяющей внутреннее значение сопротивлений элементов схемы и оказывающей влияние на движение электронов в цепи. В цифровых КИП возникает необходимость строгого регулирования и отслеживания электромагнитной совместимости аппаратуры. Динамическое изменение фиксируемой величины может спровоцировать выход из строя компаратора или операционного усилителя, повлиять на генератор опорного напряжения, а также на номиналы сопротивлений.

Заключение

Результаты проведенного анализа конструкций и уязвимостей электрических аналоговых и цифровых КИП показывают, что в наибольшей степени на ИП влияют внешнее электромагнитное воздействие и нелинейность нагрузки, но при этом стоит отметить приборы ферродинамической системы, наиболее устойчивые к данным явлениям. Дополнительно стоит отметить влияние температуры. Наиболее ярким примером является ИУ тепловой системы, строго зависящей от данного параметра, к тому же динамическое изменение температуры может спровоцировать повышение степени износа внутренних сопротивлений, изменяя его и тем самым снижая точность электрического КИП [14]. Примером является цифровой прибор с АЦП параллельного типа.

Конечно, отдельные типы ИП отличаются своей повышенной устойчивостью к влиянию приведенных явлений, но в любом случае превышение установленных значений может стать причиной искажения результатов отклонения отображаемых величин. Наиболее частой причиной этого являются нелинейности и скачкообразное превышение регистрируемых электрических параметров. Данные явления приводят к превышению рабочих параметров конструктивных элементов приборов, оказывая пагубное влияние на общую конструкцию и изменяя рабочие номинальные характеристики. Резко динамическое изменение электрической величины также пагубно влияет на элементы КИП. Износ элементов конструкции приборов и изме-

нение выставленных номиналов сказываются на паспортной точности электрического ИП, что является главным количественным показателем качества электрического ИУ.

Учитывая естественное старение элементов прибора, работу системы и характер фиксируемых величин, оказывающих наибольшее влияние на ключевые узлы приборов, например, на внутренние сопротивления, генераторы напряжения, спиральные пружины, катушки и т. п., неудивительно, что итоговая точность прибора спустя определенное время снижается. На данный момент «Росстандартом» установлен перечень межповерочных интервалов, подразумевающих проведение аттестации электрических КИП до превышения паспортной точности показателей измерений ИУ. Данный интервал может составлять от 1 года до 16 лет на приборы измерения электрической и магнитной величины. В действительности, учитывая общую специфику конструкции аналоговых-стрелочных приборов и та-

кую же отдельную форму конструкции для цифровых КИП, существует необходимость проверки и выявления тенденции снижения качественного показателя паспортной точности приборов. Для наиболее адекватной оценки результатов необходимо провести подробный анализ результатов поверки и калибровки ИУ, работавших в течение одного-трех лет, и определения динамики изменения ключевого показателя. Дополнительно предлагается составление и проектирование устройства, осуществляющего динамическое изменение величин нагрузки, температуры и внешнего электромагнитного поля, для ускорения процессов, влияющих на внутренние конструктивные узлы устройств, тем самым в ускоренном режиме изнашивающих устройство. По полученным результатам возможно построение универсальной модели, оценивающей потенциальное время изменения средней точности исследуемого электрического измерительного устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.
2. ГОСТ Р 8.656-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
3. Приказ Росстандарта от 02.07.2019 № 1502 (ред. от 24.04.2024) «Об утверждении рекомендуемых предельных значений интервалов между поверками средств измерений». URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosstandarta-ot-02072019-n-1502-ob-utverzhdanii-rekomenduemykh/> (дата обращения: 28.04.2024).
4. ГОСТ Р 8.877-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры электродвижущей силы (элементы нормальные) и меры напряжения. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
5. МИ 1202-86. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки. М., 1986. 49 с.
6. Р 50.2.050-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства поверки одинакового уровня точности. Поверка качества поверочных и калибровочных работ посредством межлабораторных сличений. Алгоритмы обработки результатов измерений. 2006. 11 с.
7. Гафаров Л. М., Завьялова И. Г., Мустафин Н. Н. Об особенностях применения критерия согласия Пирсона χ^2 // Экон. и соц.-гум. исслед. 2015. № 4. С. 63–67.
8. ГОСТ 30012.1-2002. Приборы аналоговые. Показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Межгосударственный совет по стандартизации. Метрологии и сертификации. Минск, 2002. 11 с.
9. Аналоговые и цифровые электроизмерительные приборы. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/5424/Аналоговые_и_цифровые_электроизмерительные_приборы.pdf?sequence=1 (дата обращения: 22.04.2024).
10. ГОСТ 13607-68. Приборы и преобразователи электроизмерительные цифровые. Основные термины и определения. М., 1969. 6 с.
11. Бобрышов А. П. Исследование особенностей обеспечения автоматизации поверки электрических контрольно-измерительных приборов: исследовательский проект года // Сборник ст. II Междунар. науч.-исслед. конкурса. Петрозаводск, 2023. С. 57–67.
12. Фигуровский Д. К., Романова Е. В. Влияние электромагнитного воздействия в процессе кристаллизации на морфологию структурных составляющих литых сплавов на основе Cu и Al // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 12. С. 3–8.
13. Черкасова О. А., Черкасова С. А. Термостабильность постоянных магнитов как основной фактор снятия обратимых изменений для обеспечения надежности изделия // Вестн. науки и образования. 2016. № 12. С. 6–8.

14. *Бородина Е. А., Семенова Л. Л. Зависимость сопротивления от температуры различных материалов и определение их температурного коэффициента // Вестн. кибернетики. 2019. № 1. С. 55–59.*

REFERENCES

- GOST 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow: Standardinform; 2009. 21 p. (In Russ.).
- GOST R 8.656-2009. State system of ensuring the uniformity of measurements. Means of measurement of quality indicators of electrical energy. Verification methodology. Moscow: Standardinform; 2019. 19 p. (In Russ.).
- Order of Rosstandart from 02.07.2019 No 1502 (ed. from 24.04.2024) "On approval of recommended limit values of intervals between verifications of measuring instruments". Available from: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosstandarta-ot-02072019-n-1502-ob-utverzhdanii-rekomenduemykh/> [Accessed 28 April 2024].
- GOST R 8.877-2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. Electromotive force measures (elements normal) and voltage measures. Verification methodology. Moscow: Standardinform; 2019. 19 p. (In Russ.).
- MI 1202-86. State system for ensuring the uniformity of measurements. Devices and converters measuring voltage, current, resistance digital. General requirements for verification methodology. Moscow; 1986. 49 p. (In Russ.).
- R 50.2.050-2005. State system for ensuring the uniformity of measurements. Means of verification of the same level of accuracy. Verification of quality of verification and calibration works by means of interlaboratory comparisons. Algorithms of measurement results processing. 2006. 11 p. (In Russ.).
- Gafarov L. M., Zavyalova I. G., Mustafin N. N. On the specifics of the application of the Pearson consent criterion X^2 . Economic and socio-humanitarian studies. 2015;(4):63–67. (In Russ.).
- GOST 30012.1-2002. Analog devices. Indicating direct-acting electrical measuring instruments and auxiliary parts to them. Interstate Council for Standardization. Metrology and certification. Minsk; 2002. 11 p.
- Analog and digital electrical measuring instruments. Available from: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/5424/Аналоговые_и_цифровые_электроизмерительные_приборы.pdf?sequence=1 [Accessed 22 April 2024].
- GOST 13607-68. Devices and transducers electrometric digital. Basic terms and definitions. Moscow; 1969. 6 p. (In Russ.).
- Bobryshov A. P. Investigation of the peculiarities of providing automation of verification of electrical control and measuring devices: Research project of the year 2023. Collection of articles of the II International research competition. Petrozavodsk; 2023, pp. 57–67. (In Russ.).
- Figurovsky D. K., Romanova E. V. Influence of electromagnetic influence in the process of crystallization on morphology of structural components of cast alloys based on Cu and Al. Billet production in mechanical engineering. 2012;(12):3–8. (In Russ.).
- Cherkasova O. A., Cherkasova S. A. Thermal stability of permanent magnets as the main factor of removal of reversible changes to ensure the reliability of the product. Vestnik nauki i obrazovanie. 2016;(12):6–8. (In Russ.).
- Borodina E. A., Semenova L. L. Dependence of resistance on temperature of different materials and determination of their temperature coefficient. Vestnik cybernetiki. 2019;(1):55–59. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бобрышов Алексей Павлович, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, электрические контрольно-измерительные приборы, поверка, статистика, электроника, качество продукции, организация автоматизированной поверки.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского го-

Bobryshov Aleksey P., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power industry, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of energy systems, electrical control and measuring devices, verification, statistics, electronics, product quality, organization of automated verification.

Solony Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electrome-

сударственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электромеханика, автоматизация, цифровые технологии, робототехника, электроснабжение энергетических систем, информационная безопасность, технологическое предпринимательство, искусственный интеллект.

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика, электротехника, светодиодное освещение, энергообеспечение, качество электрической энергии, цифровая энергетика, цифровая релейная защита, преобразовательная электроника.

Поступила в редакцию 08.05.2024

Поступила после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 26.07.2024

chanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electromechanics, automation, digital technologies, robotics, power supply of power systems, information security, technological entrepreneurship, artificial intelligence.

Kuzmenko Vladimir P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power engineering, electrical engineering, LED lighting, power supply, quality of electric energy, digital power engineering, digital relay protection, converter electronics.

Received 08.05.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 26.07.2024

Научная статья
УДК 623.746:005.6

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-14-21

Разработка концепции универсальной платформы беспилотного летательного аппарата на основе применения метода QFD

Радмир Салимьянович Загидуллин¹

✉ Zagidullin_Radmir@mail.ru, orcid.org/0000-0002-3175-8573, SPIN-код: 9144-3350

Алексей Александрович Ткаченко¹

tkachenko.aa@ssau.ru, orcid.org/0009-0000-2149-129X, SPIN-код: 5135-6720

Михаил Александрович Михеев¹

mikheevmisha62@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2797-4125, SPIN-код: 2707-1715

Анастасия Константиновна Крюкова¹

nastya.krukova@mail.ru, orcid.org/0009-0001-2056-8563, SPIN-код: 4005-0429

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. На основе применения метода функции развертывания качества (QFD) разработана концепция универсальной платформы беспилотного летательного мультироторного аппарата. Универсальная платформа беспилотного летательного аппарата за счет модульной сборки позволит выполнять широкий круг гражданских задач. Кроме того, концепция универсальной платформы разработана с учетом его изготовления в условиях серийного производства.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, универсальная платформа, QFD

Для цитирования: Загидуллин Р. С., Ткаченко А. А., Михеев М. А., Крюкова А. К. Разработка концепции универсальной платформы беспилотного летательного аппарата на основе применения метода QFD // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 14–21. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-3-4-14-21.

Original article

Development of the concept of a universal unmanned aerial vehicle platform based on the application of the QFD method

Radmir S. Zagidullin¹

✉ Zagidullin_Radmir@mail.ru, orcid.org/0000-0002-3175-8573, SPIN-code: 9144-3350

Alexey A. Tkachenko¹

tkachenko.aa@ssau.ru, orcid.org/0009-0000-2149-129X, SPIN-code: 5135-6720

Mikhail A. Mikheyev¹

mikheevmisha62@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2797-4125, SPIN-code: 2707-1715

Anastasia K. Kryukova¹

nastya.krukova@mail.ru, orcid.org/0009-0001-2056-8563, SPIN-code: 4005-0429

¹ Samara National Research University, Samara, Russian Federation

Abstract. Based on the application of the Quality Function Deployment (QFD) method, the concept of a universal multi-rotor unmanned aerial vehicle platform has been developed. The universal platform of an unmanned aerial vehicle, due to its modular assembly, will allow it to perform a wide range of civil tasks. In addition, the concept of a universal platform is developed taking into account its production in mass production conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicle, universal platform, QFD

For citation: Zagidullin R. S., Tkachenko A. A., Mikheyev M. A., Kryukova A. K. Development of the concept of a universal unmanned aerial vehicle platform based on the application of the QFD method. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):14–21. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-14-21.

Введение

На сегодняшний день наблюдается активное применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения как гражданских (мониторинг сельскохозяйственных угодий, состоя-

ния лесов и обнаружения пожаров, распыление удобрений, доставка грузов, картографирование, инспектирование строений и т. д.), так и военных (разведка, управление огнем артиллерии, нанесение ударов и т. д.) задач [1–4].

Однако в настоящее время, по причине технологической блокады и активного применения БПЛА в зоне военных действий, ощущается острый дефицит отечественных аппаратов универсального назначения. Кроме того, важно отметить, что отечественные БПЛА спроектированы главным образом под ручную сборку, что значительно снижает количество выпускаемых изделий.

Таким образом, **целью** данной работы является разработка концепции универсальной платформы (УП) БПЛА, конструкция которой обеспечит серийное производство и выполнение различных гражданских задач.

Под УП БПЛА в данной работе будем понимать платформу модульного построения. В зависимости от монтируемого модуля определяется назначение БПЛА. Например, монтаж модуля для распыления на сельскохозяйственных угодьях или модуля для транспортировки предметов.

В соответствии с указанной целью в данной работе поставлены следующие задачи:

- 1) провести бенчмаркинг, анализ научных публикаций и патентный анализ УП БПЛА;
- 2) определить основные требования и тактико-технические характеристики (ТТХ) БПЛА на базе УП;
- 3) провести QFD- (Quality Function Deployment) анализ УП БПЛА;
- 4) разработать концепцию УП БПЛА.

Материал и методы исследования

Для исследования состояния и оценки рынка, анализа основных предприятий-изготовителей БПЛА применен метод бенчмаркинга [5].

Для исследования сложившейся патентной ситуации, характера национального производства в странах исследования (прежде всего, в России и Китайской Народной Республике), направлений научно-исследовательской деятельности организаций и фирм, а также исследования требований потребителей к изделию применены анализ научных публикаций и патентный анализ [6].

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций производился на основе данных Российской научной электронной библиотеки eLibrary [7] и поисковой системы по научным публикациям Google Scholar [8].

Поиск патентов производился с помощью информационных сервисов по патентным и авторским свидетельствам «Яндекс.Патенты» [9] и Search International and National Patent Collections (Всемирная организация интеллектуальной собственности) [10].

Для определения характеристик, в наибольшей степени влияющих на качество изделия, в частности, на УП БПЛА, применен метод QFD.

QFD (развертывание функции качества) – метод, целью которого является преобразование голоса потребителя (требований и ожиданий) в технические характеристики изделия [11].

Применение метода QFD в значительной степени позволяет сократить цикл разработки изделий за счет снижения количества доработок. Основным инструментом QFD является особый вид матричной диаграммы – «дом качества» (House of Quality), названный так из-за своего графического представления [12].

Подробное описание применения метода QFD для разработки изделий приведено в работах [11, 12].

Разработка концепции унифицированной платформы БПЛА

На первом этапе исследования проведены бенчмаркинг, анализ отечественных и зарубежных научных публикаций и патентный анализ УП БПЛА. Бенчмаркинг показал, что международный рынок БПЛА стремительно развивается и растет и достигнет к 2027 г. 7,11 млрд евро [13]. Кроме того, военные конфликты последнего десятилетия продемонстрировали большую эффективность применения БПЛА (когда даже небольшой дрон способен нанести непоправимый ущерб тяжелой технике) и значительно ускорили развитие в сфере их разработки и производства [14].

Наиболее распространенными БПЛА для выполнения гражданских задач являются БПЛА мультироторного типа тактической группы класса «мини», в частности, квадрокоптеры с габаритными размерами до 500 мм, массой до 9 кг, со встроенной камерой и GPS-модулем [15–17].

Основными производителями БПЛА в России являются ZALA Aero Group (г. Ижевск, Удмуртия), ГК «Геоскан» (Санкт-Петербург), ООО «Беспилотные системы» (г. Ижевск, Удмуртия), ООО «Истринский экспериментальный механический завод» (Московская область, Истринский район, д. Буньково), ООО «Аэрокон» (Московская область, г. Жуковский), ООО «Специальный технологический центр» (Санкт-Петербург) [18, 19].

Основными мировыми производителями БПЛА являются GJI, Yuneec, XAG, JOUAV (КНР), 3D Robotics, Skydio, Northrop Grumman, General Atomics (США), Parrot SA, SenseFly (Франция), Israel Aerospace Industries (Израиль) [13, 18, 19].

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций и патентный анализ показали,

что существующие УП БПЛА имеют большое количество составных частей корпуса и спроектированы главным образом под ручную сборку.

Так, например, в работе [20] представлена универсальная беспилотная платформа, представляющая собой квадрокоптер, выполненный из композиционных материалов (рис. 1).

Платформа имеет демпферную палубу для виброзависимых датчиков и стабилизированный подвес для оптических приборов. Управление БПЛА осуществляется по радиоканалу с Земли либо по GPS. На платформе располагаются камера высокого разрешения, убирающиеся опоры и роботизированный захват.

В работе [21] авторы разработали беспилотный комплекс под названием «Атлас Кargo» (рис. 2).

Данная разработка позиционируется как универсальная платформа с большим полетным временем и высокой грузоподъемностью. Конструкция комплекса представляет собой карбоновую разборную раму с электродвигателями. Размах рамы составляет 1000 мм, а скорость полета может достигать 10 м/с.

В работе [22] представлена конструкция модульного беспилотного летательного аппарата (рис. 3).

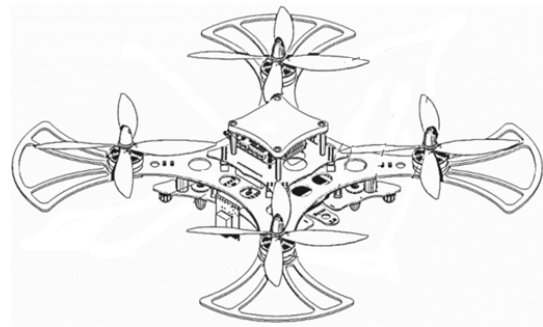
Указанный летательный аппарат выполнен из разъемных плат, соединенных между собой межплатными соединителями с фиксацией, включа-



• Рис. 1. Беспилотная платформа [20]
• Fig. 1. Unmanned platform [20]



• Рис. 2. Беспилотный комплекс «Атлас Кargo» [21]
• Fig. 2. Unmanned system “Atlas Cargo” [21]



• Рис. 3. Модульный беспилотный летательный аппарат [22]
• Fig. 3. Modular unmanned aerial vehicle [22]



• Рис. 4. Модульная платформа [23]
• Fig. 4. Modular platform [23]

ющих блок управления с основанием в виде платы управления, плату двигателей, расположенную под платой управления, и плату полезной нагрузки, расположенную под платой управления. Механическое соединение плат выполнено в виде межплатных соединителей с фиксацией, контактные штыри которых расположены перпендикулярно поверхностям плат.

В работе [23] запатентован квадрокоптер, в корпус которого встроены печатные платы, соединенные с платой управления (рис. 4).

На главной плате беспилотного летательного аппарата расположены основные датчики и центральный процессор. В состав основных датчиков входят гироскоп и трехосевые магнитные датчики.

Общими недостатками перечисленных УП БПЛА, как было указано выше, являются большое количество корпусных элементов и их ручная сборка.

На втором этапе на основе результатов определены основные требования и тактико-технические характеристики БПЛА на базе УП.

Основные требования определяются требованиями назначения (выполнение широкого круга задач), технологичности (обеспечение серийного производства), эксплуатации и ремонтпригодности (обеспечение ремонта БПЛА в полевых условиях).

Основные ТТХ БПЛА на базе УП определяются главным образом дальностью (радиусом), временем и высотой полета, массой полезной нагрузки.

На третьем этапе исследования на основе определенных требований проведен QFD-анализ УП БПЛА (рис. 5).

На основе результатов проведения QFD выявлены наиболее важные характеристики УП БПЛА, в наибольшей степени влияющие на требования назначения, технологичности, и требо-

вания к эксплуатации, технического обслуживания и ремонта:

– БПЛА мультироторного типа на базе гибридной рамы (квадрокоптер) с относительным приоритетом, равным 19,4 %;

– конструктивно-компоновочная схема БПЛА из двух составных частей (единая базовая платформа + крышка) с относительным приоритетом, равным 18,8 %;

– система управления (полетный контроллер китайского или отечественного производства с модулем GPS) с относительным приоритетом, равным 18,8 %.

На четвертом этапе на основе результатов QFD-анализа разработана концепция УП БПЛА (рис. 6).

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	БПЛА мультироторного типа на базе УП	Конструктивно-компоновочная схема УП БПЛА из двух составных частей	Массогабаритные характеристики	Система управления	Силовая установка	Питание БПЛА	Материал УП БПЛА
1	9	11,4	10,0	Требования назначения	▲	▲	○	○	○	○	○
2	9	11,4	10,0	Требования технологичности	○	○	▲	▲	▲	▲	○
3	9	10,2	9,0	Требования живучести и стойкости к внешним воздействиям	○	○	▲	○	○	○	○
4	9	10,2	9,0	Требования надежности	○	○	▲	○	○	○	○
5	9	10,2	9,0	Конструктивные требования	○	○	○	○	○	○	○
6	9	9,1	8,0	Требования к эксплуатации, удобству технического обслуживания и ремонта	○	○	○	○	○	○	○
7	9	8,0	7,0	Требования стандартизации и унификации	○	○	▲	○	○	○	○
8	9	11,4	10,0	Требования безопасности	○	▲	▲	○	○	○	○
9	9	8,0	7,0	Требования эргономики	○	○	○	○	▲	▲	▲
10	9	10,2	9,0	Технико-экономические требования	○	○	○	○	○	○	○
				Target or Limit Value	Гибридная рама	Базовая платформа с крышкой	Масса БПЛА до 5 кг, размеры до 450 мм	Полетный контроллер с модулем GPS	Углеродное волокно	Литий-полимерный аккумулятор	ПКМ
				Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	8	8	8	8	8	8	8
				Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9
				Weight / Importance	740,9	718,2	429,5	536,4	452,3	329,5	604,5
				Relative Weight	19,4	18,8	11,3	14,1	11,9	8,6	15,9

• Рис. 5. «Дом качества» QFD для УП БПЛА (выдержка)
 • Fig. 5. The "House of Quality" of QFD for the UAV universal platform (endurance)



- Рис. 6. Концепция УП БПЛА
- Fig. 6. Concept of the universal UAV platform

УП БПЛА представляет собой квадрокоптер на базе гибридной рамы закрытой конструкции массой 5 кг и габаритными размерами 420 мм. Конструкция УП БПЛА состоит из единой базовой платформы и крышки. Платформа и крышка могут быть изготовлены из ударопрочного полимера методом FDM (Fused Deposition Modeling, послойное нанесение материала) 3D-печати или методом литья под давлением. Такая простая конструкция, состоящая всего из двух частей, позволяет изготавливать УП БПЛА в условиях серийного производства.

Разработанная концепция УП БПЛА предусматривает использование полетного контроллера отечественного (например, Vostok UNO-VN035) или китайского производства (например, HEX Pixhawk 2.1 CUBE ORANGE+) с модулем GPS.

На УП БПЛА устанавливаются литий-полимерный аккумулятор, FPV-камера и устройство освещения.

На УП БПЛА предусмотрены монтажные отверстия, которые позволяют проводить монтаж модулей различного гражданского назначения: монтаж бака с насосом для опрыскивания сельскохозяйственных угодий (например, опрыскивание ядохимикатами картофельного поля), модуля камеры с тепловизором (для охраны) или устройства для транспортировки предметов.

Преимуществами разработанной концепции УП БПЛА являются:

- 1) размещение электронных компонентов, таких как регуляторы оборота двигателей, полетный контроллер и т. д. в закрытом корпусе, что обеспечивает их защиту от внешних воздействий (дождь, ветер и т. п.) и механических повреждений;
- 2) наличие монтажных отверстий на платформе БПЛА под установку многофункциональных модулей.

Заключение

В работе на основе применения метода QFD разработана концепция УП БПЛА. УП БПЛА за счет модульного построения позволяет выполнять широкий круг гражданских задач. Кроме того, концепция УП БПЛА разработана с учетом его изготовления в условиях серийного производства.

Дальнейшие работы будут направлены на разработку рабочей конструкторской документации на УП БПЛА на основе применения QFD-анализа второго уровня и DFMEA-анализа [24, 25]. Конструкция УП БПЛА будет спроектирована под массовое серийное производство с использованием 3D-печати ударопрочными полимерами и промышленных роботов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аврунев Е. И., Каверин В. Н., Горбунова А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов в кадастре и землеустройстве на территории республики Алтай // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 3. С. 11–18.
2. Поляков О. А., Козлов О. А. Состояние и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов военного назначения в России и в зарубежных странах // Академ. публицистика. 2022. № 5-2. С. 84–89.
3. Использование БПЛА в сельском хозяйстве / В. Д. Русскин [и др.] // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2023. № 1 (45). С. 4–10.
4. Романов С. В., Басуматорова Е. А. Применение беспилотных авиационных систем МЧС России во время поисково-спасательных работ и тушения пожара, на примере Ишимского района Тюменской области // Сибир. пожарно-спасат. вестн. 2023. № 1 (28). С. 103–110.
5. ГОСТ Р ИСО 17258-2015. Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов «Шесть сигм». Бенчмаркинг. М.: Стандартинформ, 2016. 50 с.
6. ГОСТ Р 15.011-96. Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. М.: Стандартинформ, 2010. 22 с.

7. Российская научная электронная библиотека eLibrary. URL: https://www.elibrary.ru/project_risc.asp (дата обращения: 15.03.2024).
8. Google Scholar. URL: <https://scholar.google.com/> (дата обращения: 15.03.2024).
9. Яндекс.Патенты. URL: <https://yandex.ru/patents> (дата обращения: 15.03.2024).
10. Search international and national patent collections. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf> (дата обращения: 15.03.2024).
11. *Дмитриев А. Я., Вашуков Ю. А., Митрошкина Т. А.* Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2016. 76 с.
12. Современные методы улучшения качества проектирования специальной технологической оснастки для испытаний сборочно-защитного блока научно-энергетического модуля / Р. С. Загидуллин [и др.] // *Качество и жизнь*. 2019. № 2 (22). С. 44–53.
13. *Paula H., Jakub S., Wlodzimierz S.* Market analysis of drones for civil use // *Scientific journal on transport and logistics*. 2023. Vol. 14, № 1. P. 55–65. Doi: 10.2478/logi-2023-0006.
14. *Евтодьева М. Г., Целицкий С. В.* Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства // *Пути к миру и безопасности*. 2019. № 2. С. 104–111.
15. *Ahmed E. T., Ariffanan B., Mohd F. R.* Quadcopter UAV dynamic modeling and PID trajectory tracking control design // *Sensor and instrumentation system series*. 2021. № 24. P. 55–77.
16. *Серебряков Д. А., Давыдов А. Д.* Влияние унификации на выбор БПЛА в эксплуатации // *Экономика высокотехнологичных производств*. 2023. Т. 4, № 1. С. 41–49.
17. *Сундарева В. Ю.* Анализ и перспективы развития рынка производства БПЛА // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики: в 3 т. Т. 2.* Красноярск, 2023. С. 1063–1065.
18. *Галлямова Э. Ф.* Мировой рынок беспилотных авиационных систем: тенденции и перспективы развития // *Наука и общество на пути к модернизации: современные взгляды, новые горизонты: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2023.* С. 174–176.
19. *Костин А. С., Богатов Н. В.* Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов в России и мире // *Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докл. Первой Междунар. науч. конф. СПб., 2020.* С. 125–130.
20. Универсальная беспилотная платформа / М. В. Титович [и др.] // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. № 14. С. 904–906.
21. Беспилотные авиационные комплексы. 2024. URL: <https://atlas-aero.ru/bpla-atlas-3m-kargo> (дата обращения 17.03.2024).
22. Патент 182586U1 Рос. Федерация № 2018111511. Модульный беспилотный летательный аппарат / И. Е. Петров, М. И. Трещанин, А. Ю. Богатов; заявл. 30.03.2018; опубл. 23.08.2018. 8 с.
23. Патент KR10162341B1 Южная Корея. № KR1020000025603 А. Модули стыковки плат для мультикоптеров. Опубл. 20.01.2015. 12 с.
24. *Загидуллин Р. С., Митрошкина Т. А., Высоцкая М. В.* Совершенствование процесса градуировки датчиков тепловых потоков для термовакуумных испытаний космических аппаратов // *Известия Самар. Науч. центра Рос. акад. наук*. 2019. Т. 21, № 24. С. 88–96.
25. *Загидуллин Р. С., Липатов П. О.* Разработка конструкции теплозащитного покрытия перспективных средств выведения // *Тепловые процессы в технике*. 2022. Т. 14, № 3. С. 98–106.

REFERENCES

1. Avrunev E. I., Kaverin V. N., Gorbunova A. A. Use of unmanned aerial vehicles in the inventory and land management in the territory of Altai Republic. *Inter-jekspo Geo-Sibir' = Interekspo Geo-Siberia*. 2023;(3):11–18. (In Russ.).
2. Polyakov O. A., Kozlov O. A. State and perspectives of development of military unmanned aerial vehicles in Russia and in foreign countries. *Akademicheskaja publicistika = Academic journalism*. 2022;5(2):84–89. (In Russ.).
3. Ruskin V. D., Moshurov V. M., Yasnikov A., Vershinin A. K., Safonova T. V. Use of the UAV in the agricultural industry. *Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo = Information technologies and systems: management, economy, transport, right*. 2023;1(45):4–10. (In Russ.).
4. Romanov S. V., Basumatorov E. A. Use of pilotless aviation systems of Ministry of Emergency Situations during search and rescue operations and fire extinguishing, on the example of Ishimsky district of the Tyumen region. *Sibirskij pozharno-spatatel'nyj vestnik = Siberian rescue and firefighting messenger*. 2023;1(28):103–110. (In Russ.).

5. GOST P 15.011-96. System of Development and Statement of Products on production. Patent researches. Moscow: Standartinform; 2010. 22 p. (In Russ.).
6. GOST P ISO 17258-2015. Statistical methods. Quantitative methods of improvement of processes "Six sigma". Benchmarking. Moscow: Standartinform; 2016. 50 p. (In Russ.).
7. Russian scientific electronic library eLibrary. Available from: https://www.elibrary.ru/project_risc.asp [Accessed 15 March 2024].
8. Google Scholar. Available from: <https://scholar.google.com/> [Accessed 15 March 2024].
9. Yandex. Patents. Available from: <https://yandex.ru/patents> [Accessed 15 March 2024].
10. Search International and National Patent Collections Available from: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf> [Accessed 15 March 2024].
11. Dmitriyev A. Ya. Robastnoye design and technology preparation of production of products of an aeronautics: studies. grant. Samara: SGAU publishing house; 2016. 76 p. (In Russ.)
12. Zagidullin R. S., Barinov P. V., Burkova V. A. et al. Modern methods of improvement of quality of design of the special machining attachments for tests of an assembly shielding block of the scientific and power module. *Kachestvo i zhizn' = Quality and life*. 2019;2(22):44–53. (In Russ.).
13. Paula H., Jakub S., Wlodzimierz S. Market analysis of drones for civil use. *Scientific journal on transport and logistics*. 2023;14(1):55–65. Doi: 10.2478/logi-2023-0006.
14. Evtodyeva M. G., Tselitsky S. V. Military unmanned aerial vehicles: tendencies in the field of developments and production. *Puti k miru i bezopasnosti = Ways to the world and safety*. 2019;(2):104–111. (In Russ.).
15. Ahmed E. T., Ariffanan B., Mohd F. R. Quadcopter UAV dynamic modeling and PID trajectory tracking control design. *Sensor and instrumentation system series*. 2021;(24):55–77.
16. Serebryakov D. A., Davydov A. D. Influence of unification on the choice of the UAV in operation. *высокотехнологичных производств. Jekonomika vysokotekhnologichnyh proizvodstv = Economy of high technology productions*. 2023;(4):41–49. (In Russ.).
17. Sundareva V. Yu. Analysis and perspectives of market development of production of the UAV. Actual problems of aircraft and aeronautics: the collection of materials IX of the International scientific and practical conference devoted to Day of aeronautics: in 3 vol. Vol. 2. Krasnoyarsk; 2023, pp. 1063–1065. (In Russ.).
18. Galyamova E. F. World market pilotless aviation systems: tendencies and perspectives of development. Science and society on the way to modernization: modern views, new horizons: Materials III of the All-Russian scientific and practical conference. Rostov-on-Don; 2023, pp. 174–176. (In Russ.).
19. Kostin A. S., Bogatov N. V. The analysis of the market of unmanned aerial vehicles in Russia and the world. Space instrument making and operational technologies: collection of reports of the First International scientific conference. SPb.; 2020, pp. 125–130. (In Russ.).
20. Titovich M. V., Titovich M. V., Metelkina S. D., Vinevsky G. V., Samorodov V. V., Ram L. M. Universal pilotless platform. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual problems of aircraft and aeronautics*. 2018;(14):904–906. (In Russ.).
21. Pilotless aviation complexes. Available from: <https://atlas-aero.ru/bpla-atlas-3m-kargo> [Accessed 15 March 2024].
22. Patent 182586U1 Russian Federation. No 2018111511. Modular unmanned aerial vehicle; I. E. Petrov, M. I. Treshchanin, A. Yu. Bogatov; declared 30.03.2018; published 23.08.2018. 8 p. (In Russ.).
23. Patent South Korea. No KR1020000025603 A. Modules of joining of payments for multikopter: KR10162341B1. Published 20.01.2015. 12 p.
24. Zagidullin R. S., Mitroshkina T. A., Vysotskaya M. V. Improvement of process of graduation of sensors of thermal streams for thermal vacuum tests of spacecrafts. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = News of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(24):88–96. (In Russ.).
25. Zagidullin R. S., Lipatov P. O. Development of a design of a heat-shielding covering of perspective means of removal. *Teplovye processy v tehnike = Thermal processes in equipment*. 2022;14(3):98–106. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Загидуллин Радмир Салимьянович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета им. акад. С. П. Королёва.

Zagidullin Radmir S., PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara National Research University.

Область научных интересов – робастное проектирование, 3D-печать, композиционные материалы, проектирование, испытания, конструкция авиационно-космической техники.

Ткаченко Алексей Александрович, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета им. акад. С. П. Королёва.

Область научных интересов – беспилотные летательные аппараты, системы ассоциативно-параметрического проектирования.

Михеев Михаил Александрович, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета им. акад. С. П. Королёва.

Область научных интересов – космические аппараты, роботизация.

Крюкова Анастасия Константиновна, магистрант, инженер 1-й категории кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского национального исследовательского университета им. акад. С. П. Королёва.

Область научных интересов – беспилотные летательные аппараты, организация производства.

Поступила в редакцию 15.05.2024

Поступила после рецензирования 23.05.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Research interests – robust design, 3D printing, composition materials, design, production, construction of aerospace equipment.

Tkachenko Alexey A., Postgraduate Student at the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara National Research University.

Research interests – unmanned aerial vehicles, associative-parametric design systems.

Mikheyev Mikhail A., Postgraduate Student at the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara National Research University.

Research interests – spacecrafts, robotization.

Kryukova Anastasia K., Master's Student, Engineer 1st Category at the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering, Samara National Research University.

Research interests – unmanned aerial vehicles, production organization.

Received 5.05.2024

Revised 23.05.2024

Accepted 26.07.2024

Научная статья
УДК 658.821: 339.372

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-22-27

Инновации в вендинге: направления технического совершенствования

Надежда Никифоровна Крупина¹

✉ Krupina_n17@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7983-8-45X, SPIN-код: 9014-000

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Обозначены факторы роста, основные направления и тенденции, с помощью патентного анализа приведены примеры инновационного технологического развития вендингового сервиса. Отмечены межотраслевой и многодисциплинарный характер инноваций, их роль в конкуренции. Выявлены управленческие рутинные, преодоление которых возможно через более широкую адаптацию Digital-технологий, составлен профиль вендинга и предложены новые показатели KPI.

Ключевые слова: торговый автомат, вендинг, инновации, технический уровень, технологическая модернизация, облачные технологии, KPI продуктивности

Для цитирования: Крупина Н. Н. Инновации в вендинге: направления технического совершенствования // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 22–27. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-3-4-22-27.

Original article

Innovations in vending: directions for technical improvement

Nadezhda N. Krupina¹

✉ Krupina_n17@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7983-8-45X, SPIN-code: 9014-000

¹ St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Growth factors, main directions and trends are outlined, examples of innovative technological development of the vending service are given with the help of patent analysis. The intersectoral and multidisciplinary nature of innovations and their role in competition are noted. Management routines have been identified, which can be overcome through a broader adaptation of Digital-technologies, a vending profile has been compiled and new KPI-indicators have been proposed.

Keywords: vending machine, vending, innovation, technical level, technological modernization, cloud technologies, productivity criteria

For citation: Krupina N. N. Innovations in vending: directions for technical improvement. *Innovationnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):22–27. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-22-27.

Введение

Вендинг – торговая услуга, оказываемая с помощью автоматизированных систем, или торговых автоматов. Сегодня это высокотехнологичный, рентабельный и высокодоходный вид бизнеса, в котором многофункциональные аппараты заменяют продавцов и кассиров. По прогнозам консультантов компании *Technavio*, годовые темпы роста потребительских сегментов глобального рынка вендинга до 2030 г. будут оставаться достаточно высокими.

Факторы роста масштабов вендинга в России:

- 1) урбанизация, индустриализация, демографический рост;
- 2) растущий спрос и готовность предпринимателей стимулировать клиентов и повышать их лояльность путем внедрения бонусной системы, акций и скидок;

3) разнообразные формы безналичного расчета и скорость обслуживания;

4) антироссийские санкции, уход зарубежных брендов, введение ограничений на поставки зарубежного оборудования, политика импортозамещения;

5) незначительный объем первоначальных инвестиций при входе на рынок;

6) сотрудничество с китайскими предпринимателями – лидерами рынка.

По мере появления новых облачных сервисов элементы вендинга совершенствуются в соответствии с меняющимися требованиями рынка, поэтому важно оценить потенциал инноваций в области этой новой экономической деятельности, которая приобретает особую значимость в связи со стремительным ростом потребительского спроса.

Согласно действующему законодательству, новизна и практическая применимость инноваций

подтверждаются патентами на изобретения и полезные модели. Своевременный патентный анализ остается эффективным приемом получения актуальной, ценной и надежной информации о направлениях технологического совершенствования бизнес-процессов. В области торговли более 25 % патентов связано с вендингом, что свидетельствует о перспективности инноваций в отрасли [1].

Цель исследования – выявить основные тенденции и осмыслить направления развития инновационного процесса в вендинге посредством анализа научных статей и патентов, опубликованных за 2020–2023 гг.

Результаты патентного анализа

Обзор роботизированным аптечных устройств (киосков продаж, складов, фасующих роботов, систем доставки) сделан авторами работ [2, 3]. Отмечается, что лучшие решения имеют преимущества за счет значительно уменьшенного размера, лазерной навигации, машинного зрения, оптимизированной маршрутизации, устройств открытия дверей и дистанционного управления роботом, беспроводной системы связи. Прогрессивные автоматы выполняют набор функций. Например, робот Mega-Fixu («Мега-Умник») осуществляет приемку лекарственных средств и перевязочных материалов, их хранение, мониторинг сроков годности, инвентаризацию, приемку и отправку электронных накладных поставщикам, а также снабжение препаратами приемного покоя, дневного стационара, поликлиники в целом.

Основной тренд отечественного рынка вендинга – *технологическое развитие*, ориентированное на оптимизацию пространства, сокращение потерь товара, более эффективное управление запасами, снижение издержек и максимальную персонализацию сервиса. В числе решаемых задач – разработка программного обеспечения, мобильных приложений, расширение функций в части «умного» вендинга, уменьшение размера аппаратов, популяризация безналичной оплаты через бонусную систему, использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа потребительского спроса и предпочтений клиентов с ориентацией на индивидуализацию продаж.

Анализ опубликованных сведений указывает на многодисциплинарный, межотраслевой и полифункциональный характер инноваций в вендинге. Ключевые области знаний охватывают вычислительную технику, электротехни-

ку, телеметрию, материаловедение, менеджмент, психологию, маркетинг. Базовые технологии – контрольно-измерительная и робототехника, автоматизация и искусственный интеллект, Интернет вещей, мобильные платежи, облачные решения, бесконтактные интерфейсы, аналитика больших данных и сервисы персонализации.

Высокий технический уровень предлагаемых решений обеспечивает технологию реализации вендинга в виде программно-аппаратных комплексов на базе искусственного интеллекта, компонентов робототехники и беспроводной связи. Примеры отдельных решений:

- для кофе-машин устранялись такие недостатки, как отсутствие механизма, регулирующего степени помола зерен, низкая функциональность, плохая обратная связь для своевременного возобновления ингредиентов, габариты и вес аппарата, т. е. кофе-машины (патенты CN 112053502, RU 2739650 и 2789598);

- в части аппаратов, совмещающих хранение замороженных блюд и их разогрев, продажи горячих первых и вторых блюд в пластиковой упаковке, преодолевались сложности конструкции, медленный разогрев, повышенный риск нарушения санитарных норм (патенты RU 2674708, 2751827, 2767462). Конструкции со встроенными микроволновыми печами и комбинированным нагревом (сверхвысокочастотное и инфракрасное излучение);

- глубокая («шоковая») заморозка продуктов в сочетании с мощными микроволновыми печами – вот базовые технологии. Клиенту предлагается выбор платежной системы, товара с помощью интерактивного меню на сенсорном дисплее с подключением к сети Интернет. Услуга сопровождается рекламой, а обратная связь обеспечивается сенсорными видеомонитором и экраном;

- в отношении камер хранения заказов реализуется режим автономного функционирования при отсутствии питания от электрической сети, проводится контроль состояния заказа (вес, объем, упаковка), присутствуют устройства обеззараживания камеры и систем обратной связи (патенты RU 121622 и 195511, US 2010/0026452);

- в вопросе фискального учета продаж открываются возможности контроля и управления фискальной отчетностью (модули конвертации налоговой отчетности и данных о транзакциях в формате открытого протокола MDB для передачи на удаленный сервер службы налогового учета);

- в части сложных конструкций, обеспечивающих, например, продажу жареного картофеля, сочетают многие операции – смену фритюра, санитарную очистку поверхностей, вентиляцию за-

грязненного воздуха, приготовление пищи в потоке горячего воздуха (аэрофритюр). Если первые аппараты (патенты US 4722267, US 5097754, RU 2015109) были громоздкими, менее надежными, не обеспечивали хорошую вентиляцию и должное качество продукта, повышали энерго- и материалоемкость; имели большие габариты, масляные насосы, много рабочих механизмов и создавали трудности в обслуживании, то новые решения (например, патент RU 2788318) предполагают улучшенную рабочую камеру в виде вращающегося сетчатого барабана, в который вентилятором нагнетается горячий воздух для обжарки шариков, а вибромотор обеспечивает их перемешивание. Упрощается конструкция, улучшается качество блюд;

– установка rfid-антенн (патент RU 2729373) связывает автоматы с удаленными станциями контроля и расширяет круг рабочих операций: например, выбор определенного контейнера из группы аппаратов разных форм и размеров, перемещение, хранение, высокоточное фиксирование фактов извлечения товара, определение его наличия или отсутствия, управление освещением, температурой, влажностью, замками, поддержка бесперебойного питания. Нейросети оперативно анализируют данные о товарных остатках, выполняют запросы на транзакции, передают информацию пользователям.

Следует отметить глобальные тенденции:

– монополия безналичной системы оплаты (cashless): карты, СМС-сообщения, QR-коды, NFC-технологии (коммуникации ближнего поля – Near Field Communication) для использования мобильного телефона;

– повышенное внимание к энергосбережению: в торговых автоматах используются светодиоды, солнечные батареи и другие системы генерации тепла для подогрева блюд;

– рост привлекательности автоматов как носителей социальной и коммерческой рекламы: онлайн-решения придают им новые дополнительные функции, креативный дизайн улучшает внешний вид и концентрирует внимание потенциального покупателя, сенсорные экраны становятся средством информирования;

– ориентация на ESG-принципы бизнеса путем выбора технических решений, направленных на охрану окружающей среды (утилизация отходов, вторичное использование посуды и упаковки);

– рост удельного веса здоровой пищи в общем объеме продаваемых блюд, что отражает потребительский запрос и соответствует практике профилактики ряда заболеваний: например, используются мобильные приложения на базе ис-

кусственного интеллекта для подсчета калорийности продуктов и определения уровня глюкозы в крови после их потребления [4];

– разрабатывается программное обеспечение для мобильных устройств (планшетов, смартфонов, нательных аппаратов) для контроля в режиме реального времени важных параметров предоставляемой услуги, включая медицинские цели, с учетом образа жизни и профессиональной деятельности покупателя.

Вместе с тем практика вендинга демонстрирует многочисленные мелкие рутинные проблемы, которые, как правило, не носят технико-технологического характера и не требуют инженерных решений. К числу технических задач можно отнести отсутствие систем видеонаблюдения и устройств, фиксирующих или даже предотвращающих случаи кражи, вандализма, махинаций персонала. Претензии пользователей возникают по поводу низкой износостойкости автоматов, частых поломок, некорректной работы, неопрятного внешнего вида. В основном недоработки объясняются непростыми условиями обслуживания аппаратов, установленных вне помещений, на открытых неухоженных площадках, где происходят накопление насекомых в пространстве аппарата, быстрый износ машин из-за экстремальных погодных условий [5].

Нерешенные управленческие задачи связаны с отсутствием:

– необходимой отраслевой нормативной и методической базы;

– четкого текущего планирования, контроля, аналитики качества и эффективности работ по обслуживанию вендинговых аппаратов;

– оптимизационного планирования и анализа загрузки автоматов в границах локальных участков с учетом пропускной способности территории;

– истории ремонта аппаратов с учетом условий эксплуатации, контроля расходования материалов и запасных частей во время ремонта;

– должной квалификации техников, обслуживающих торговые автоматы, и продуманной системы обучения;

– критериев эффективного планирования ассортимента;

– оперативного взаимодействия менеджеров, операторов, склада.


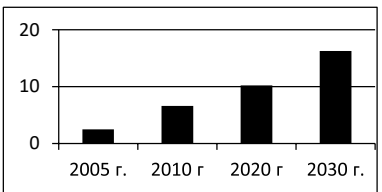
Просмотр интернет-форумов показал, что долгое время системной проблемой вендинга оставалась неэффективная организация работы с заявками на выездное обслуживание автоматов. Сначала заявки на выезд принимались и распределялись вручную, что приводило к малоэффективным хаотичным коммуникациям посредством мессенджеров и телефонов. Развитие

облачных технологий позволило преодолеть эту проблему: сегодня заявки принимаются разными способами – посредством звонка в колл-центр, QR-кода, с помощью телеметрии, автоматически от робота-диспетчера. Инновационным прорывом стало внедрение мобильного приложения FSM-системы для сбора заявок из разных источников и автоматического распределения их на выездных специалистов. Реализована возможность оперативно получать заявки, более результативно руководить обслуживанием, направляя специалистов с необходимыми компетенциями, прикладывая фото- и видеоматериалы, оценивать качество ремонта, контролировать уровни запасов и запросов запасных частей, сохранять

и анализировать историю обслуживания объектов. Автоматизация работы с заявками не только устранила многие проблемы, но и минимизировала время подачи и обработки заявок.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что рост привлекательности вендинга для жителей мегаполисов делает инновационную технологическую модернизацию сервиса основным инструментом конкурентной борьбы. Это, в свою очередь, предопределяет введение новых показателей продуктивности вендинга (KPI – Key Performance Indicators), а именно:

1) *число просроченных заявок* в расчете на одного выездного специалиста: отношение общего числа просроченных или невыполненных в пла-

АВТОМАТ КАК ОСНОВА БИЗНЕСА	
	<p>Механические мини-аппараты, электронные автоматы, автоматы для продажи напитков.</p> <p>Структура автомата для продажи товара:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контейнер для хранения товара, корпус, дверца; – приспособление для транспортировки товара; – приемник монет, купюр, пластиковых карт; – автоматика и системный модуль управления; – датчик контроля выдачи товара
НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ	
ОСНОВНОЙ ОБЪЕКТ – ВЕНДИНГОВЫЙ АППАРАТ	СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ
<ul style="list-style-type: none"> – Точность фиксации факта извлечения товара из аппарата; – сохранность качества, блюд, высоких вкусовых и полезных свойств, безопасность; – дозировка и перемешивание в чашке заданных ингредиентов; – упрощение конструкции и систем хранения, промывки, нагрева, выдачи, наблюдения; – система удаленного контроля и мониторинга из единого центра управления, коммуникации 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Система приема оплаты – терминал безналичной оплаты, монетоприемник, банкнотоприемник. 2. Онлайн-касса (выдача сдачи и чека, заполнение приходного кассового ордера, способы инкассации, конвертация данных отчетности). 3. Режим технического обслуживания и ремонта. 4. Управляющая и энергетическая системы, подача воздуха, воды, нагрев, слив в канализацию при промывке, хранение продуктов и посуды, учет ассортимента и потерь, модуль связи и телеметрии. 5. Пользовательский интерфейс с возможностью оперативной обратной связи для персонификации обслуживания
ДИНАМИКА МИРОВОГО РЫНКА	
 <p>Мировой рынок вендинга, млрд долл.</p>	<p>Прогноз до 2030 г. темпов роста сегментов вендингового рынка, % в год:</p> <ul style="list-style-type: none"> – торговые автоматы – 16,81; – смарт-вендинг – 9,5; – промышленный вендинг – 6,3; – интерактивные киоски – 3,9; – билетные автоматы – 10–17; – постаматы – 10–12
ПРИОРИТЕТЫ УПРАВЛЕНИЯ	
<ul style="list-style-type: none"> Формирование ядра лояльных клиентов через персонификацию сервиса. Повышение результативности и эффективности систем удаленного мониторинга. Оптимизационное управление затратами через инновации. Опережающее конкурентов обновление ассортимента предлагаемых товаров. Формирование экосистем с дружественными деловыми партнерами 	

- Профиль вендинга (URL: versous.ru>tpost/m>7p01vjlm1-vending-i (дата обращения 27.04.2024)
- Vending profile (Available from: versous.ru>tpost/m>7p01vjlm1-vending-i [Accessed 27 April 2024])

новые сроки заявок к среднесписочному числу выездных работников;

2) *объем прямых потерь выручки* на одну просроченную заявку: отношение объема недополученной выручки к числу невыполненных заявок;

3) *концентрация заявок*: общая (как отношение числа однотипных заявок (поломок) к их общему числу) и по типу автоматов (как отношение числа однотипных заявок к числу автоматов одного вида);

4) *коэффициент роста затрат на ремонт аппаратов*: отношение величины затрат на ремонт в текущем году к таковым в предшествующем периоде. Значение показателя выше темпа инфляции за этот же период может служить сигналом появления проблем в обслуживании аппаратов;

5) *душевой объем затрат на ремонт*: отношение величины затрат на ремонт в текущем году к среднесписочному числу выездных работников. Одновременный рост этого показателя, коэффициента роста затрат на ремонт и числа просроченных заявок может служить прямым указанием на недостаток компетенций и менеджеров, и обслуживающих специалистов.

Дальнейшее развитие вендинга обусловлено развитием новых технологий в области разработки мультироботных систем с более совершенными алгоритмами координации для воспроизводства сенсорных способностей человека [6]. Автоматы-роботы будут все более пригодными по всем техническим направлениям – от жизненно важных решений по реагированию на стихийные бедствия до обыденных процессов, например, развития сетевой вендинговой инфраструктуры.

Современные Digital-сервисы позволяют любое число автоматов с помощью GSM-модулей подключить к единому центру ответственности и получать полную информации в режиме реаль-

ного времени, что кратно повышает эффективность дистанционного управления. Встроенные нейросетевые системы самодиагностики поддерживают работоспособность центра управления даже при отключении некоторых устройств, при этом снижают затраты на обслуживание.

Электронная промышленность активно включилась в реализацию национальных проектов народосбережения, создавая технологический задел в виде программно-аппаратных комплексов по обеспечению доступности современных инженерных средств проектирования [7]. Следуя этим тенденциям, сервисные компании могут опережать события и оставаться конкурентоспособными в постоянно меняющейся среде.

Профиль современного вендинга показан на рисунке.

Заключение

Перспективный и растущий отечественный вендинговый рынок пока еще остается мало освоенным: в развитых странах на 1 жителя приходится до 40 аппаратов, в России – не более 15. Активный инновационный процесс оказывает благоприятное влияние на рост рентабельности, инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности вендингового бизнеса. Поэтому вектор развития ориентирует не столько на увеличение числа автоматов, сколько на их совершенствование и расширение функционала путем технологической модернизации. Динамика наращивания инженерного и технико-технологического потенциала вендинга свидетельствует об открытии новых коммерческих возможностей, что, в свою очередь, стимулирует и сам дальнейший процесс инновационного совершенства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шинкарёва О. В., Майорова Е. А. Инновации в розничной торговле: результаты патентного анализа // Рос. предпринимательство. 2017. Т. 18, № 15. С. 231–242. Doi: 10.18334/rp.18.15.38210.
2. Кугач А. А., Кугач В. В., Игнатьева И. В. Аптечные роботы // Вестн. фармации. 2018. № 2 (80). С. 84–94.
3. Роботы в больничных аптеках / Е. И. Юркевич [и др.] // Вестн. фармации. 2019. № 2 (80). С. 84–94.
4. Toward a multivariate prediction model of pharmacological treatment for women with gestational diabetes mellitus: algorithm development and validation / C. Velardo [et al.] // Journal of Internet research. 2021. № 23 (3). P. E21435. Doi: 102196/21435.
5. Сафонов А. И. Исследование проблем управления вендинговыми компаниями в России // NovaInfo. 2017. № 67. С. 96–100. URL: <https://novainfo.ru/article/13368> (дата обращения: 30.04.2024).
6. Drew S. D. Multi-agent systems for search and rescue applications // Current robotics reports. 2021. № 2. P. 189–200. Doi: 10.1007/s43154-021-00048-3.
7. Козлов С. В., Кубанков А. Н., Шабанов А. П. Модуль принятия решений по интеллектуальной поддержке наукоемких производств // Наукоемкие технологии в косм. исслед. Земли. 2022. Т. 14, № 2. С. 36–43. Doi: 10.36724/2409&5419&2022&14&2&36&43.

REFERENCES

1. Shinkaryova O. V., Mayorova E. A. Innovation in retail: the results of a patent analysis. Russian journal of entrepreneurship. 2017;18(15):231–242. (In Russ.). Doi: 10.18334/rp.18.15.38210.
2. Kuhach A. A., Kuhach V. V., Ihnatsyeva A. V. Pharmacy robots. Bulletin of the pharmaceutical industry. 2018;(2(80)):84–94. (In Russ.).
3. Yurkevich E. I., Kuhach V. V., Ihnatsyeva A. V., Tarasova E. N., Voitovich E. S. Robots in hospital pharmacies. Bulletin of the pharmaceutical industry. 2019;(2(80)):84–94. (In Russ.).
4. Velardo C. et al. Toward a multivariate prediction model of pharmacological treatment for women with gestational diabetes mellitus: algorithm development and validation. Journal of Internet research. 2021;(23(3)):E21435. Doi: 102196/21435.
5. Safonov A. I. Research of problems of management of vending companies in Russia. NovaInfo. 2017;(67):96–100. (In Russ.). Available from: <https://novainfo.ru/article/13368> [Accessed 30 April 2024].
6. Drew S. D. Multi-agent systems for search and rescue applications. Current robotics reports. 2021;(2):189–200. Doi: 10.1007/s43154-021-00048-3.
7. Kozlov S. V., Kubankov A. N., Shabanov A. P. Module of decision-making on intellectual support of high-tech industries. High-tech technologies in space. research. land. 2022;14(2):36–43. (In Russ.). Doi: 10.36724/2409&5419&2022&14&2&36&43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Крупина Надежда Никифоровна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры технологии управления и сервиса Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.

Область научных интересов – инновационный менеджмент, инновации в сфере техногенной безопасности, климатические проекты.

Krupina Nadezhda N., D. Sc. in Economics, Full Professor, Professor at the Department of Management Technology and Service, St. Petersburg State Agrarian University.

Research interests – innovative management, innovations in the field of technogenic safety, climate projects.

Поступила в редакцию 04.06.2024

Поступила после рецензирования 11.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Received 04.06.2024

Revised 11.06.2024

Accepted 26.07.2024

Подход к оптимизации процесса управления персоналом посредством внедрения цифровых технологий

Валентина Михайловна Милова¹

milovavalentina@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4567-4271, SPIN-код: 7165-7699

✉ Алина Дмитриевна Гаврилова¹

gavrilovaalina@mail.ru, SPIN-код: 9088-8288

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Направление развития цифровых технологий в наши дни – объективная реальность, которая предполагает, в первую очередь, цифровизацию процессов как основу цифровой трансформации бизнеса, способствующую повышению качества продукции и услуг, повышению гибкости и адаптивности к изменениям на рынке. Цифровая трансформация бизнеса основана на использовании новых технологий, таких как Интернет вещей, искусственный интеллект, аналитика данных, облачные вычисления и др. Эти технологии позволяют автоматизировать и оптимизировать бизнес-процессы, собирать и анализировать большие объемы данных, принимать более точные и обоснованные решения, а также создавать новые цифровые продукты и услуги. Как следствие, повышаются показатели результативности деятельности предприятий, бизнес становится наиболее конкурентоспособным и готовым к изменениям на рынке.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, процесс, оптимизация, процессный подход

Для цитирования: Милова В. М., Гаврилова А. Д. Подход к оптимизации процесса управления персоналом посредством внедрения цифровых технологий // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 28–33. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-28-33.

Original article

An approach to optimizing the personnel management process through the introduction of digital technologies

Valentina M. Milova¹

milovavalentina@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4567-4271, SPIN-code: 7165-7699

✉ Alina D. Gavrilova¹

gavrilovaalina@mail.ru, SPIN-code: 9088-8288

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The direction of digital technology development nowadays is an objective reality, which primarily involves the digitalization of processes as the basis for digital business transformation, contributing to improving the quality of products and services, increasing flexibility and adaptability to changes in the market. Digital business transformation is based on the use of new technologies such as the Internet of things, artificial intelligence, data analytics, cloud computing and others. These technologies allow you to automate and optimize business processes, collect and analyze large amounts of data, make more accurate and informed decisions, and create new digital products and services. As a result, the performance indicators of enterprises are increasing, the business becomes the most competitive and ready for changes in the market.

Keywords: digitalization, digital transformation, process, optimization, process approach

For citation: Milova V. M., Gavrilova A. D. An approach to optimizing the personnel management process through the introduction of digital technologies. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):28–33. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-28-33.

Управление промышленным предприятием в условиях цифровизации приобретает особую значимость и актуальность. Пристальное внимание привлекают цифровые технологии, которые предоставляют новые возможности для оптимизации бизнес-процессов, повышения производительности и конкурентоспособности предприятия.

Да, оптимизация бизнес-процессов и внедрение новых технологий на предприятии действительно представляют собой сложную задачу, требующую системного подхода и непрерывного улучшения. Важно разработать эффективную стратегию управления бизнес-процессами, которая будет ориентирована на достижение поставленных целей и улучшение общей производительности предприятия.

В настоящее время ключевым фактором развития предприятия, повышения его конкурентоспособности и эффективности является процесс управления персоналом.

Декомпозиция процесса управления персоналом с учетом основных подпроцессов для определения возможностей реализации цифрового проекта приведена на рис. 1 [1].

Результативная оптимизация процессов возможна только с учетом качественно определенной приоритетности направления цифровизации процессов [2].

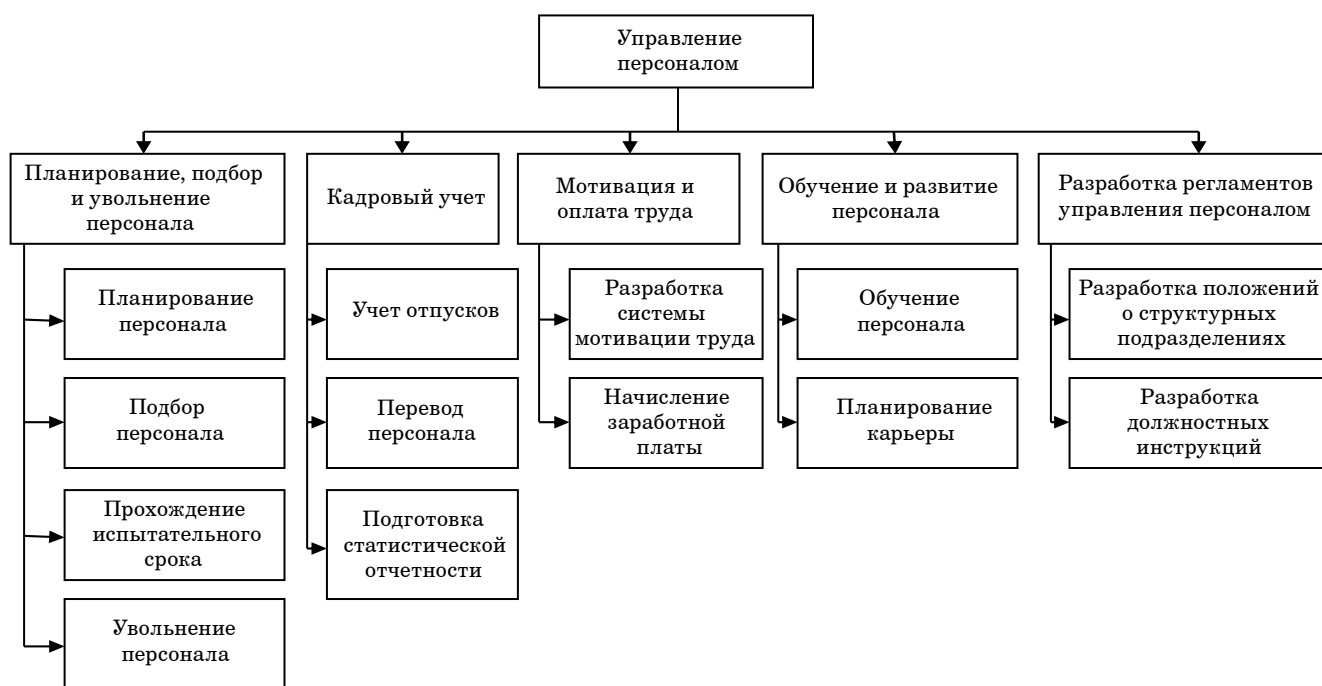
Исходя из этого, разработана последовательность действий определения критических процессов и направлений цифровизации (рис. 2; 3).

Совершенствование бизнес-процессов возможно только за счет комплексной оценки состояния

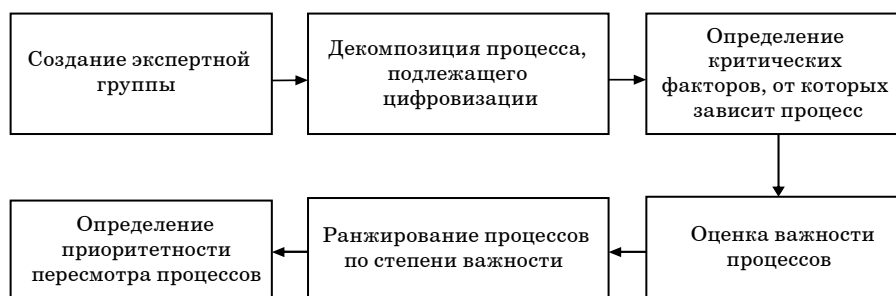
каждого процесса. Потребности в оптимизации выявляются путем экспертной оценки, проводимой рабочей группой экспертов по шкале, приведенной в табл. 1.

Общее количество критических факторов успеха (КФУ) по процессу рассчитывается как сумма факторов, влияющих на процесс. Комплексная оценка важности процесса (B_k) рассчитывается как произведение средневзвешенной оценки важности процесса экспертом на количество критических факторов успеха по формуле (1) [3]:

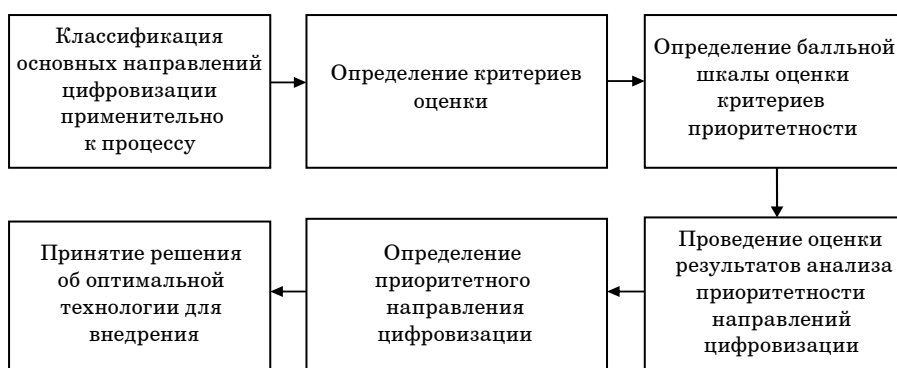
$$B_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \sum_{j=1}^m y_j, \quad (1)$$



• Рис. 1. Декомпозиция процесса управления персоналом
 • Fig. 1. Decomposition of the personnel management process



• Рис. 2. Схема последовательности определения критических процессов, подлежащих цифровизации
 • Fig. 2. Sequence diagram for determining critical processes to be digitized



• *Рис. 3. Схема определения направлений цифровизации критического процесса*
 • *Fig. 3. The scheme for determining the directions of digitalization of the critical process*

• *Таблица 1. Шкала оценки важности бизнес-процессов*
 • *Table 1. The scale of assessment of the importance of business processes*

Оценка важности	Баллы	Показатель
	5	Особо ответственный процесс, его важность в текущих обстоятельствах крайне велика для предприятия
	4	Процесс важен и влияет на основную деятельность предприятия
	3	Процесс считается текущим, выходы контролируются, но он не имеет стратегического характера для основной деятельности предприятия
	2	Выходы процесса иногда имеют значение и несут формальный характер
	1	Важность процесса практически не имеет значения

• *Таблица 2. Шкала ранжирования комплексной оценки важности бизнес-процессов*
 • *Table 2. A ranking scale for a comprehensive assessment of the importance of business processes*

Интервальные значения «проблемности» бизнес-процессов	Диапазон значений	Характеристика
	(0; 6]	Процесс не требует вмешательства и пересмотра
	(6; 12]	Процесс нуждается в контроле и периодической оценке
	(12; 18]	Процесс нуждается в оптимизации и улучшениях
	(18; 24]	Процесс подлежит первоочередному пересмотру
	(24; 30]	Процесс не терпит отлагательств в изменении и улучшении

• *Таблица 3. Классификация основных направлений цифровизации*
 • *Table 3. Classification of the main directions of digitalization*

Направление цифровизации	Применяемые технологии
Техническая цифровизация	Технологии бесконтактного считывания данных; цифровой обмен данными; автономные работы
Программная цифровизация	3D-моделирование; технологии инжиниринга; цифровая централизация управления
Аналитическая цифровизация	Облачные вычисления; большие данные; Интернет вещей

где n – число экспертов; x_i – оценка важности экспертом i -го подпроцесса; m – количество факторов (КФУ); y_j – значение влияния j -го фактора на процесс.

Комплексная оценка важности процесса позволяет установить приоритетность цифровизации бизнес-процессов, которая устанавливается в соответствии со шкалой табл. 2 и на основе данных табл. 5.

В результате полученных расчетов приоритетность цифровизации бизнес-процессов следующая: 1, 7, 8.

Определение направления цифровизации будем проводить на основе данных табл. 3, представляющей основную классификацию направлений.

Первоочередность направления цифровизации определяется по следующим критериям: «Применимость», «Затратность» и «Безопасность». Шкала оценки критериев представлена в табл. 4. Обоз-

наченные критерии оцениваются экспертной группой. Анализ приоритетности цифровизации на примере критерия безопасности приведен в табл. 6.

- Таблица 4. Балльная шкала оценки критериев
- Table 4. The point scale of criteria assessment

Критерий	Баллы	Показатель
Безопасность (Б)	5	Высокие риски утечки информации при внедрении той или иной технологии
	4	Риски утечки информации при внедрении той или иной технологии выше среднего
	3	Средние риски утечки информации при внедрении той или иной технологии
	2	Низкие риски утечки информации при внедрении той или иной технологии
	1	Риски утечки информации при внедрении той или иной технологии отсутствуют
Применимость (П)	5	Особо значимый (ключевой)
	4	Высокая значимость
	3	Средняя значимость
	2	Значимость минимальна
	1	Значимость отсутствует
Затратность (З)	1	Низкие затраты
	2	Средние затраты
	3	Затраты выше среднего
	4	Высокие затраты
	5	Затраты, приводящие к отсутствию экономического эффекта в будущем

- Таблица 5. Расчет комплексной оценки важности бизнес-процессов
- Table 5. Calculation of a comprehensive assessment of the importance of business processes

Критические факторы успеха	Критические факторы успеха						$\sum_{j=1}^m y_j$	Оценка важности бизнес-процесса					Комплексная оценка важности бизнес-процессов
	Финансовые ресурсы	Кадровые ресурсы	Временные ресурсы	Мотивация сотрудников	Защита данных	Точность исполнения		1	2	3	4	5	
1. Планирование персонала	x	x	x			x	4	5	4	4	3	4	16
2. Подбор персонала	x	x				x	3	3	2	2	3	3	7,8
3. Прохождение испытательного срока принятыми сотрудниками	x	x	x		x	x	5	2	1	2	1	1	7
4. Увольнение персонала	x			x		x	3	1	2	1	1	1	3,6
5. Учет отпусков	x	x	x	x	x	x	6	2	1	3	1	2	12
6. Перевод персонала	x	x	x				3	4	5	3	4	3	11,4
7. Подготовка статистической отчетности		x	x		x	x	4	5	5	4	5	5	19,2
8. Разработка системы мотивации труда	x		x	x	x	x	5	5	4	4	4	5	22
9. Начисление заработной платы		x	x		x	x	4	4	3	3	2	3	12
10. Обучение персонала	x	x			x		3	4	4	3	4	3	10,8
11. Планирование карьеры	x		x			x	3	3	4	4	4	3	10,8
12. Разработка положений о структурных подразделениях	x	x	x		x	x	5	2	1	2	3	2	10
13. Разработка должностных инструкций	x	x	x			x	4	4	3	4	3	3	13,6

- Таблица 6. Анализ приоритетности цифровизации (критерия (Б))
- Table 6. Digitalization priority analysis (criterion (S))

Уровень 0	Уровень 1	№ п/п	Уровень 2	Экспертные оценки					Ср. знач.	Σ средн. знач.	Групп. коэф.	Ярусн. коэф.
				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5				
Направления цифровизации	Техническая цифровизация	1	Технологии бесконтактного считывания данных	3	2	3	2	3	2,6	9,8	0,265	0,12
		2	Цифровой обмен данными	4	5	4	5	3	4,2		0,429	0,19
		3	Автономные роботы	3	3	4	3	2	3		0,306	0,14
	Программная цифровизация	4	3D-моделирование	1	2	1	2	2	1,6	8,4	0,190	0,04
		5	Технологии инжиниринга	2	3	3	4	3	3		0,357	0,07
		6	Цифровая централизация управления	4	4	3	4	4	3,8		0,452	0,09
	Аналитическая цифровизация	7	Облачные вычисления	4	3	3	4	4	3,6	11,4	0,316	0,11
		8	Большие данные	4	5	4	4	4	4,2		0,368	0,13
		9	Интернет вещей	3	4	4	4	3	3,6		0,316	0,11

- Таблица 7. Расчет индекса приоритетности направлений цифровизации
- Table 7. Calculation of the priority index of digitalization directions

Направление цифровизации			Коэффициенты			
			Б	П	З	Приоритетность
Техническая цифровизация	1	Технологии бесконтактного считывания данных	0,12	0,11	0,11	0,00145
	2	Цифровой обмен данными	0,19	0,19	0,10	0,00361
	3	Автономные роботы	0,14	0,16	0,06	0,00134
Программная цифровизация	4	3D-моделирование	0,04	0,03	0,15	0,00018
	5	Технологии инжиниринга	0,07	0,05	0,14	0,00049
	6	Цифровая централизация управления	0,09	0,09	0,10	0,00081
Аналитическая цифровизация	7	Облачные вычисления	0,11	0,11	0,09	0,00109
	8	Большие данные	0,13	0,15	0,12	0,00234
	9	Интернет вещей	0,11	0,11	0,13	0,00157

По аналогии проводится анализ приоритетности цифровизации для критериев «Применимость» и «Затратность». По результатам ярусных коэффициентов проводим обобщение результатов. На основе полученных значений критериев вычисляем индекс приоритетности по формуле (2):

$$P_p = B \cdot P \cdot Z, \quad (2)$$

где B – безопасность; П – применимость; З – затратность (критерии выбора направления цифровизации). Таким образом, наиболее приоритетным для организации будет процесс с наибольшим индексом приоритетности (табл. 7).

Таким образом, в соответствии с проведенной оценкой, приоритетным направлением цифровизации для процессов 1, 7, 8 является цифровой обмен данными. Примером цифрового решения в данном случае может стать система контроля и управления доступом (СКУД) или автоматизированное рабочее место (АРМ).

В работе представлен комплексный подход к внедрению цифровых решений в процесс управления персоналом на промышленном предприятии, для этого разработана последовательность действий: определены критические процессы предприятия; определены направления цифровизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антохина Ю. А., Варжапетян А. Г., Семенова Е. Г. Современные инструменты менеджмента качества. СПб.: ГУАП, 2011.
2. Ковригин Е. А., Васильев В. А. Проблемы готовности системы менеджмента качества к интеграции современных цифровых технологий // Качество. Инновации. Образование. 2020. № 5. С. 17–23.
3. Милова В. М. Модели и методы ситуационного управления сложными организационными системами: учеб.-метод. пособие. СПб.: ГУАП, 2021. 115 с.

REFERENCES

1. Antokhina Yu. A., Varzhapetyan A. G., Semenova E. G. Modern tools of quality management. SPb.: SUAI; 2011. (In Russ.).
2. Kovrigin E. A., Vasiliev V. A. Problems of readiness of the quality management system for the integration of modern digital technologies: Quality. Innovation. Education. 2020;(5):17–23. (In Russ.).
3. Milova V. M. Models and methods of situational management of complex organizational systems: studies. – the method. stipend. SPb.: SUAI; 2011. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Милова Валентина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление в социальных и экономических системах, экспертно-аналитические методы оценки качества.

Гаврилова Алина Дмитриевна, магистр кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процессов и систем менеджмента.

Поступила в редакцию 09.06.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Milova Valentina M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – management in social and economic systems, expert and analytical methods of quality assessment.

Gavrilova Alina D., Master's Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management of processes and management systems.

Received 09.06.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 26.07.2024

Научная статья
УДК 658.5

DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-34-39

Проектирование производственных процессов изготовления наукоемкой продукции

Александр Валерьевич Чабаненко¹

✉ a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-код: 7009-4753

Мария Дмитриевна Рассыхаева¹

mitschiru@yandex.ru, SPIN-код: 3296-6240

Виктория Сергеевна Комарова¹

vikap1999@mail.ru, SPIN-код: 1185-1776

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Инновации играют решающую роль в современном мире, определяя вектор развития экономики, общества и технологий. В условиях глобальной конкуренции и стремительного технического прогресса компании и государства вынуждены искать новые пути повышения эффективности, качества и устойчивости своей продукции и услуг. Введение инноваций в производственные процессы, бизнес-модели, маркетинговые стратегии и организационные структуры становится неотъемлемой частью стратегии развития успешных компаний. В данной статье рассмотрены различные виды и типы инноваций, а также их влияние на наукоемкие отрасли промышленности.

Технологические инновации являются одной из ключевых движущих сил прогресса. Они включают в себя как радикальные, так и улучшающие инновации. Радикальные инновации представляют собой принципиально новые технологии, которые могут полностью изменить существующие рынки или создать новые. Примеры таких инноваций – разработка Интернета, создание первых персональных компьютеров и других революционных технологий, которые изменили образ жизни миллионов людей. С другой стороны, улучшающие инновации представляют собой совершенствование существующих технологий и продуктов. Эти инновации менее востребованы, но не менее важны, так как они позволяют повышать производительность и качество продукции. Примерами могут служить улучшение процессоров, разработка новых версий операционных систем и других технологий, которые делают нашу повседневную жизнь более комфортной и эффективной.

Наукоемкая продукция является важным компонентом инновационной экономики. Электроника, авиакосмическая техника, биотехнологии, информационные технологии, нанотехнологии, энергетика и робототехника – все эти отрасли требуют высоких инвестиций в научные исследования и разработки и являются основными двигателями технологического прогресса.

Динамика развития современного промышленного производства определяет постоянную инновационную направленность для решения задач технологии и организации производства и задач управления.

Ключевые слова: производство, наукоемкая продукция, производственные процессы

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Для цитирования: Чабаненко А. В., Рассыхаева М. Д., Комарова В. С. Проектирование производственных процессов изготовления наукоемкой продукции // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 34–39. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-34-39.

Original article

Design of production processes for the manufacture of high-tech products

Aleksandr V. Chabanenko¹

✉ a@chabanenko.ru, orcid.org/0000-0002-5949-6579, SPIN-code: 7009-4753

Maria D. Rassyhaeva¹

mitschiru@yandex.ru, SPIN-code: 3296-6240

Victoria S. Komarova¹

vikap1999@mail.ru, SPIN-code: 1185-1776

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Innovations play a crucial role in the modern world, determining the vector of economic, social and technological development. In the context of global competition and rapid technological progress, companies and governments are forced to look for

new ways to improve the efficiency, quality and sustainability of their products and services. The introduction of innovations into production processes, business models, marketing strategies and organizational structures is becoming an integral part of the development strategy of successful companies. This article examines various types and types of innovations, as well as their impact on knowledge-intensive industries.

Technological innovation is one of the key drivers of progress. They include both radical and improving innovations. Radical innovations are fundamentally new technologies that can completely change existing markets or create new ones. Examples of such innovations include the development of the Internet, the creation of the first personal computers and other revolutionary technologies that have changed the way of life of millions of people. On the other hand, improving innovations are improvements to existing technologies and products. These innovations are less dramatic, but no less important, as they allow for increased productivity and product quality. Examples include the improvement of processors, the development of new versions of operating systems and other technologies that make our daily lives more comfortable and efficient.

Knowledge-intensive products are an important component of an innovative economy. Electronics, aerospace engineering, biotechnology, information technology, nanotechnology, energy and robotics — all these industries require high investments in research and development and are the main engines of technological progress.

The dynamics of the development of modern industrial production determines the constant innovative orientation of both solving the problems of technology and organization of production, as well as management tasks.

Keywords: manufacturing, high-tech products, production processes

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. FSRF-2023-0003 "Fundamental principles for the construction of noise-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

For citation: Chabanenko A. V., Rassyhaeva M. D., Komarova V. S. Design of production processes for the manufacture of high-tech products. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):34–39. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-34-39.

Современный этап развития экономики нашей страны характеризуется значительным увеличением роли наукоемких предприятий, что становится важным конкурентным преимуществом отечественной экономики и способствует увеличению доли импортозамещения. Наукоемкий сектор и масштабы применения высоких технологий в экономике являются показателями научно-технического и экономического потенциала страны.

Предприятия производят продукцию и оказывают услуги, используя разнообразные ресурсы – материальные, трудовые, финансовые и интеллектуальные. Эффективная система управления предприятием должна способствовать производству продукции, востребованной обществом и рынком, обеспечивая при этом оптимальное использование всех доступных ресурсов. В условиях повышенной динамики внешней среды и усиления конкуренции на рынке система управления должна быть нацелена на создание устойчивых конкурентных преимуществ и повышение конкурентоспособности предприятия.

Управление предприятием основывается на анализе информации о внешней среде и данных о внутренних возможностях компании. Часто процесс организации производства воспринимается исключительно как обработка информации, однако это не совсем верно. Управление должно рассматриваться как непрерывный процесс принятия решений, основанный на прогнозной информации, что позволяет оперативно реагировать на изменения и адаптироваться к новым условиям.

Количественное выражение наукоемкости производства, рассчитанное на стоимостной основе:

$$K = Q(t) / P(t),$$

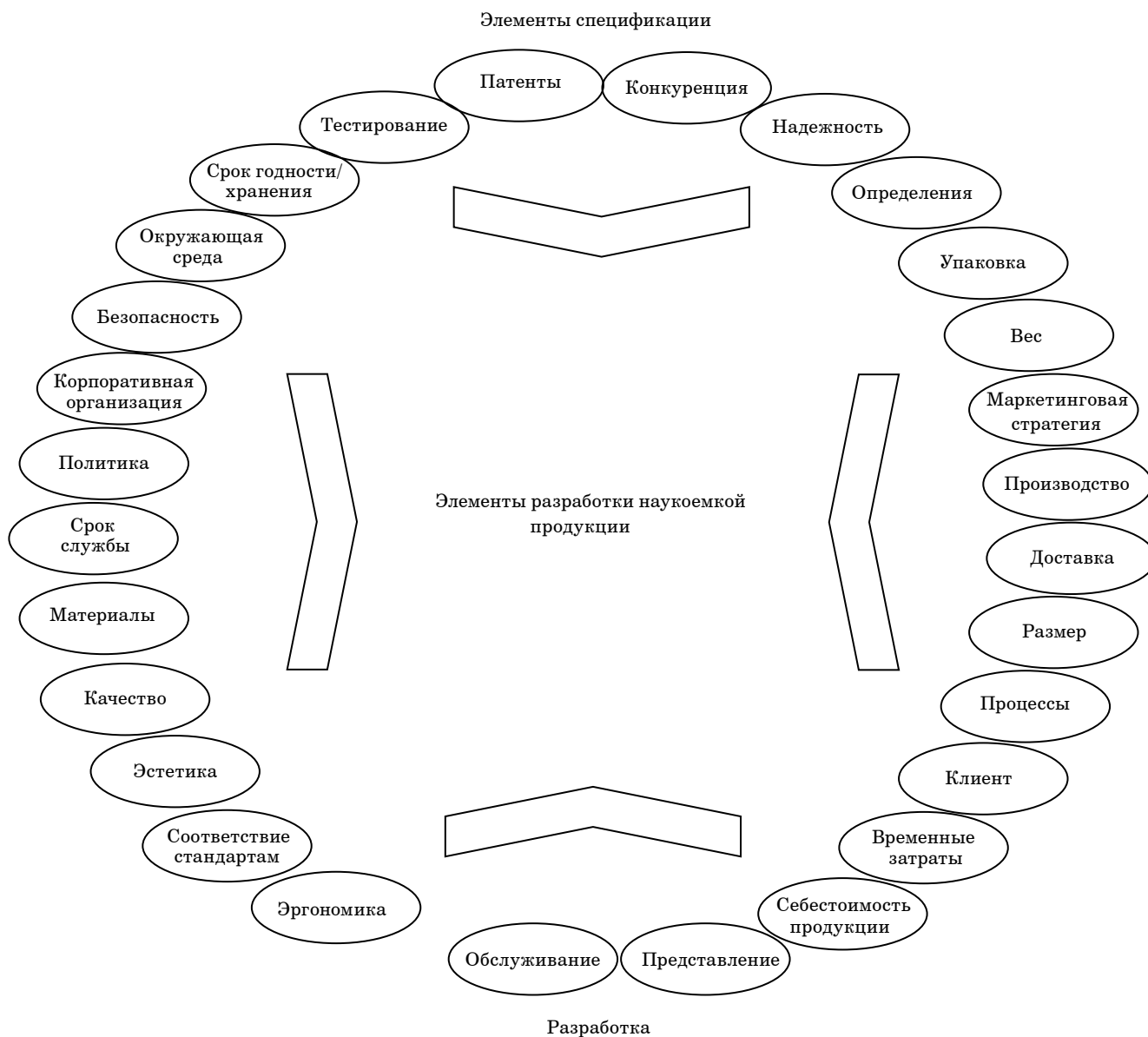
где K – уровень наукоемкости производства; $Q(t)$ – величина затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР); P – показатель объема продукции, стоимость продукции; t – период производства наукоемкой продукции.

Наукоемкое производство должно обладать следующими особенностями: масштабируемость, совместимость, модульность, мобильность, универсальность и регулируемость. Эти особенности требуют расширенного информационного сопровождения производственных систем. Кроме того, такой тип производства предъявляет повышенные требования к срокам технологической подготовки, методам оперативного управления и мероприятиям по размещению нового производства, таким как реконструкция.

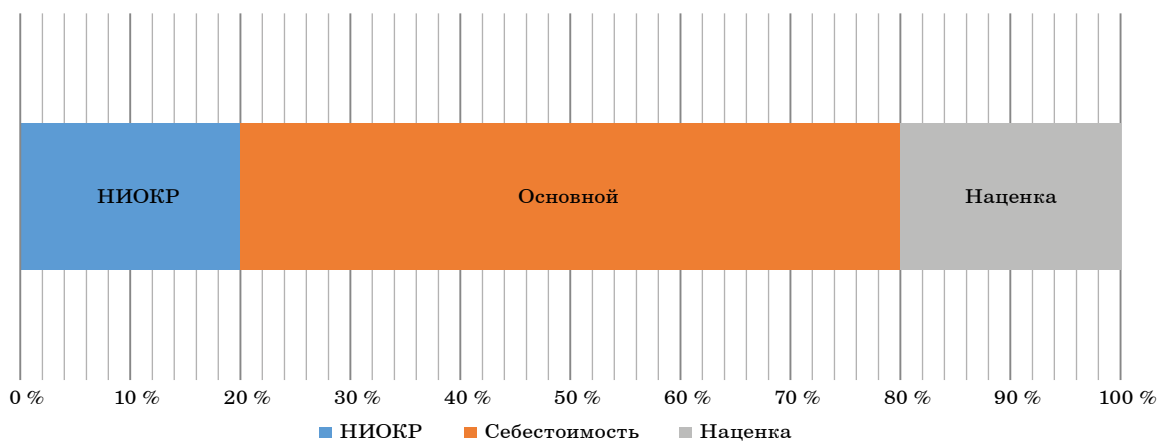
Решение задач информационного сопровождения обеспечивается системами автоматизации, такими как системы проектирования технологических процессов и системы оперативного управления производством. Работа этих систем основана на электронных моделях различных аспектов производства. При создании новых производственных объектов рекомендуется использовать современные подходы к моделированию, такие как системы класса NX, CATIA, CREO. На рис. 1 показано формирование показателей наукоемкой продукции согласно международной классификации объектов.

Доля НИОКР в разработке инновации показана на рис. 2.

Управление производством наукоемкой продукции представляет собой один из наиболее зна-



• Рис. 1. Формирование показателей объекта
 • Fig. 1. Formation of object indicators



• Рис. 2. Доля НИОКР в разработке инновации
 • Fig. 2. The share of R&D in the development of innovation

чимых и сложных аспектов деятельности руководителей и специалистов. Этот процесс включает в себя комплекс сложных операций и явлений, возникающих на промышленных предприятиях в ходе реализации инновационных проектов [2].

Результаты научной деятельности могут быть следующими:

- изобретения;
- полезная модель;
- промышленный образец.

Результаты инновационной деятельности:

- базисная инновация;
- улучшающая инновация;
- псевдоинновация.

Результаты инновационной производственной деятельности:

- модернизация;
- улучшение;
- удешевление.

Таблица показателей наукоемкости представляет структурированный подход к анализу и управлению различными аспектами производственного процесса.

Учет наукоемкости ускоряет инновационное развитие, помогая быстрее внедрять новые технологии и разработки, сокращая время от идеи

до коммерциализации. Это также улучшает качество продукции за счет использования передовых технологий и методов, что способствует удовлетворению потребностей клиентов и укреплению репутации предприятия, что будет полезно для проектирования и управления наукоемким производством.

Наукоемкий процесс в первом приближении рассматривается как процесс преобразования входных элементов (ресурсов, информации и т. п.) в выходные результаты (новые товары, новые технологии и т. п.). Этот подход основывается на предположении, что процесс инноваций, связанный с творческой деятельностью, по своей природе является иррациональным и неорганизованным.

Такой подход учитывает, что наукоемкие процессы требуют значительных вложений различных видов ресурсов, включая материальные, трудовые, финансовые и интеллектуальные. Эти процессы включают в себя множество этапов, начиная от фундаментальных исследований и заканчивая коммерциализацией новых продуктов и технологий. Важными особенностями являются высокая степень неопределенности и риск, что требует гибкости и адаптивности в управлении.

- *Таблица показателей инновационности*
- *Table of innovation indicators*

Показатель	Описание	Метод измерения	Цель
Научная активность	Количество патентов и научных публикаций на одного сотрудника	Среднее количество патентов и публикаций на одного сотрудника за год	Увеличение научной активности для укрепления научного потенциала
Уровень автоматизации	Процент использования автоматизированных систем в производственных процессах	Процентное отношение автоматизированных процессов к общему числу производственных процессов	Увеличение уровня автоматизации для повышения эффективности производства
Коэффициент импортозамещения	Доля продукции, произведенной с использованием отечественных технологий и компонентов, в общем объеме производства	Процентное отношение продукции, произведенной с отечественными технологиями и компонентами, к общему объему	Увеличение коэффициента импортозамещения для снижения зависимости от внешних поставок
Гибкость производства	Способность предприятия быстро адаптироваться к изменениям на рынке и внедрять новые технологии и продукты	Время (в месяцах) на адаптацию и внедрение новых технологий после изменения рыночных условий	Повышение гибкости для быстрой адаптации к рыночным изменениям
Квалификация персонала	Уровень образования и количество специалистов с учеными степенями среди сотрудников предприятия	Процентное отношение сотрудников с высшим образованием и учеными степенями к общему числу сотрудников	Повышение квалификации персонала для увеличения профессионального уровня и эффективности
Коммерциализация инноваций	Доля инновационных разработок, которые успешно коммерциализировались в течение определенного периода	Процентное отношение коммерциализированных разработок к общему числу разработок за определенный период	Увеличение коммерциализации инноваций для роста доходов и рыночного присутствия

Для достижения успеха в наукоемких процессах важно не только эффективно преобразовывать входы в выходы, но и поддерживать постоянное развитие и совершенствование методов и подходов к управлению. Это подразумевает внедрение современных систем автоматизации, таких как системы проектирования технологических процессов и системы оперативного управления производством, которые работают на основе электронных моделей.

Применение современных подходов к моделированию объектов, таких как системы класса NX, CATIA, CREO, позволяет оптимизировать и ускорить процессы разработки и внедрения инноваций, обеспечивая высокую степень масштабируемости, совместимости, модульности, мобильности, универсальности и регулируемости производственных систем.

В итоге наукоемкий процесс можно рассматривать как динамическую и сложную систему, требующую непрерывного управления и совершенствования для достижения конкурентных преимуществ и устойчивого развития в условиях современной экономики.

Проектирование производственных процессов изготовления наукоемкой продукции требует учета множества факторов, таких как специфика продукции, технологические требования, ресурсные ограничения и экономическая эффективность.

Проектирование производственных процессов изготовления наукоемкой продукции представляет собой многогранный и комплексный процесс, включающий в себя анализ требований, разработку концепции, проектирование технологических процессов и систем, а также контроль качества и безопасность. Начальный этап подготовки к производству наукоемкой продукции включает в себя тщательный анализ требований к продукции – технических спецификаций, нормативных и законодательных ограничений, а также изучение доступных технологий, материалов и ресурсов. На основе этих данных разрабатывается концепция производственного процесса, и проводится технико-экономическое обоснование для выбора оптимального варианта с точки зрения затрат и эффективности.

На этапе проектирования технологического процесса разрабатывается последовательность операций, выбираются оборудование и инструменты, определяется применение инновационных решений и автоматизации для повышения производительности и качества продукции. Для проверки и оптимизации технологического процесса используются методы моделирования и симуляции, что позволяет выявить потенциальные

проблемы и внести корректировки до начала производства.

Проектирование производственной инфраструктуры включает в себя разработку планировки помещений, систем энергоснабжения, водоснабжения, вентиляции и других инженерных систем, а также определение необходимого оборудования и его размещение. Система контроля качества разрабатывается для обеспечения качества продукции на всех этапах производства и включает в себя методы и средства измерения, контрольные точки и процедуры управления качеством.

Перед массовым производством запускается пилотное производство для проверки и наладки всех компонентов процесса. В ходе наладки выявляются и устраняются возможные проблемы, проводится дополнительная настройка оборудования и технологий. После успешного завершения пилотного этапа начинается массовое производство, сопровождаемое системами непрерывного мониторинга и улучшения производственных процессов. Это позволяет оперативно реагировать на изменения и повышать эффективность производства, обеспечивая высокое качество продукции при оптимальных затратах.

Таким образом, проектирование производственных процессов изготовления наукоемкой продукции требует комплексного подхода, включающего в себя анализ требований, разработку технологических процессов, моделирование и оптимизацию, а также внедрение и контроль качества. Применение математических моделей и аналитических таблиц позволяет значительно повысить эффективность и экономичность производственных процессов. Важно учитывать специфику продукции, технологические требования, ресурсные ограничения и экономические аспекты при проектировании производственных процессов. Это позволяет создавать высококачественную и конкурентоспособную продукцию, удовлетворяющую потребности рынка и обеспечивающую успешное развитие предприятия.

В заключение можно отметить, что проектирование производственных процессов является сложной и многогранной задачей, требующей использования различных методологий и инструментов. Анализ требований, разработка технологических процессов, моделирование и оптимизация, а также внедрение и контроль качества являются ключевыми этапами, обеспечивающими успешное проектирование и производство наукоемкой продукции. Применение математических моделей и аналитических таблиц позволяет значительно улучшить процессы и достичь высоких показателей эффективности и качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чабаненко А. В. Стандартизация наукоемкой продукции // РИА. Стандарты и качество. 2015. № 1. С. 42–47.
2. Чабаненко А. В. Управление качеством аддитивного производства // РИА. Стандарты и качество. 2024. № 7. С. 98–104.
3. Chabanenko A. V., Kurlov A. V. Control the quality of polymers based on the model of Dzeno // Journal of physics: conference series. 2021. P. 1889.
4. Chabanenko A. V., Kurlov A. V., Tour A. C. Model to improve the quality of additive production by forming competencies in training for high-tech industries // J. phys.: conf. ser. 2020. № 1515. P. 052065.
5. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality assurance of hull elements of radio-electronic equipment by means of control system // J. phys.: conf. ser. 2018. № 1515. P. 052065.
6. Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент): отчет о деятельности организации. URL: <http://www.rupto.ru/> (дата обращения: 10.06.2024).

REFERENCES

1. Chabanenko A. V. Standardization of high-tech products // RIA. Standards and quality. 2015;(1):42–47. (In Russ.).
2. Chabanenko A. V. Quality management of additive manufacturing // RIA. Standards and quality. 2024;(7):98–104. (In Russ.).
3. Chabanenko A. V., Kurlov A. V. Control the quality of polymers based on the model of Dzeno. Journal of physics: conference series. 2021, pp. 1889.
4. Chabanenko A. V., Kurlov A. V., Tour A. C. Model to improve the quality of additive production by forming competencies in training for high-tech industries. J. phys.: conf. ser. 2020;(1515):052065.
5. Chabanenko A. V., Yastrebov A. P. Quality assurance of hull elements of radio-electronic equipment by means of control system J. phys.: conf. ser. 2018;(1515):052065.
6. Federal service for intellectual property (Rospatent): report on the activities of the organization. Available from: <http://www.rupto.ru/> [Accessed 10 June 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – аддитивные технологии, интеллектуальные системы управления качеством.

Мария Дмитриевна Рассыхаева, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, физика, управление качеством, тестирование программного обеспечения.

Комарова Виктория Сергеевна, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством, инноватика.

Chabanenko Aleksandr V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – additive technologies, intelligent quality management systems.

Rassyhaeva Maria D., Postgraduate Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – mathematical modeling, physics, quality management, software testing.

Komarova Victoria S., Postgraduate Student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality management, innovation.

Поступила в редакцию 10.06.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Received 10.06.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 26.07.2024

Типы стандартизированной работы в системе бережливого производства в производственных системах «Тойоты» и «Росатома»

Кирилл Вячеславович Золотухин¹

✉ zoloto.kv@mail.ru, orcid.org/0009-0001-5164-3204, SPIN-код: 8043-6670

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена стандартизированная работа как один из ключевых элементов производственной системы «Тойоты», а также ее адаптированная версия в рамках производственной системы «Росатома». Рассмотрены существующие три типа стандартизированной работы, предназначенные для различных производственных условий. Приведены примеры для каждого из трех типов, а также их соответствие производственным процессам.

Ключевые слова: стандартизированная работа, производственная система «Тойота», производственная система «Росатома», время такта, время цикла, стандартизация

Для цитирования: Золотухин К. В. Типы стандартизированной работы в системе бережливого производства в производственных системах «Тойоты» и «Росатома» // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 40–44. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-40-44.

Original article

Types of standardized work in lean production systems: Toyota production system and Rosatom production system

Kirill V. Zolotukhin¹

✉ zoloto.kv@mail.ru, orcid.org/0009-0001-5164-3204, SPIN-code: 8043-6670

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper examines standardized work as one of the key elements of the Toyota Production System (TPS) and its adaptation in the Rosatom Production System (RPS). The three existing types of standardized work designed for various production conditions are discussed. Examples for each of the three types are provided, as well as their correspondence to production processes.

Keywords: standardized work, Toyota production system, Rosatom production system, takt time, cycle time, standardization

For citation: Zolotukhin K. V. Types of standardized work in lean production systems: Toyota production system and Rosatom production system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):40–44. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-40-44.

Введение

Продумывая необходимость того или иного оборудования, расположение машин, методы обработки, внедряя автономизацию, совершенствуя приспособления, учитывая способы транспортировки и корректируя запасы незавершенного производства, производится устранение семи видов потерь (Муда), не добавляющих ценности для клиента. В стремлении к эффективным методам производства на рабочих местах и производственных линиях возникает потребность стать основой для улучшений и эффективного производства, чем является стандартизированная работа (СР).

Данный метод является одной из фундаментальных концепций производственной системы «Тойота» (TPS). В Российской Федерации одним

из флагманов, успешно практикующих основанную на принципах TPS собственную производственную систему, является корпорация «Росатом». «Бережливая» концепция «Росатома» известна как производственная система «Росатома» (ПСР) [1].

СР подразделяется на три типа, в зависимости от характера и содержания выполняемых операций.

Целью данного исследования является аналитический обзор существующих типов СР на примере TPS и ПСР.

Понятие стандартизированной работы и ее типы

Основой каждого процесса улучшения является уровень жизни, который описывает этот про-

цесс. Без стандарта не может быть улучшения. Устойчивость каждого улучшения должна быть описана в новом определяемом стандарте.

В настоящее время в нашей стране СР регламентируется тремя нормативными документами [2–4]. В ГОСТ Р 56908-2016 и ГОСТ Р 56407-2023 «стандартизация работы» представлена в качестве метода бережливого производства, а в ГОСТ Р 56020-2020 как инструмент – «стандартизованная работа» [5].

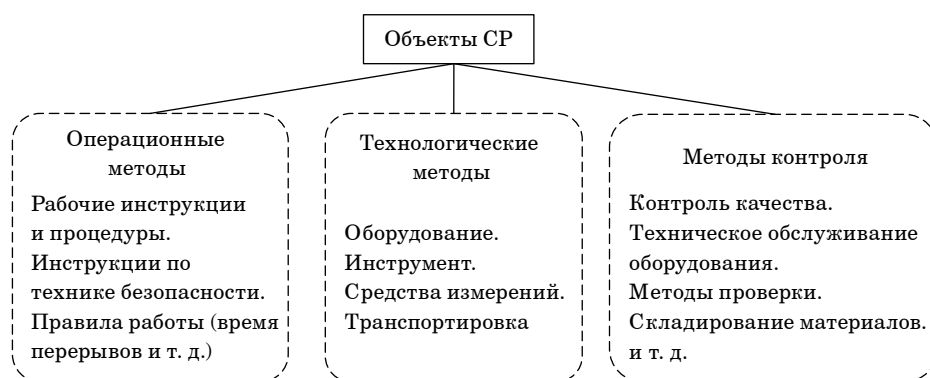
Объектами стандартизации являются операционные (ориентированные на человека), технологические методы (ориентированные на машины и процессы), а также методы контроля [6], ориентированные на правила (рис. 1).

СР не может быть установлена, если отсутствует какой-либо из трех основных ее элементов: время такта (ТТ) – темп потока для синхронизации процессов; последовательность работ – разбивка заданий для определения СР; незавершенное производство (НЗП) – запасы, необходимые для поддержания потока [5, 6].

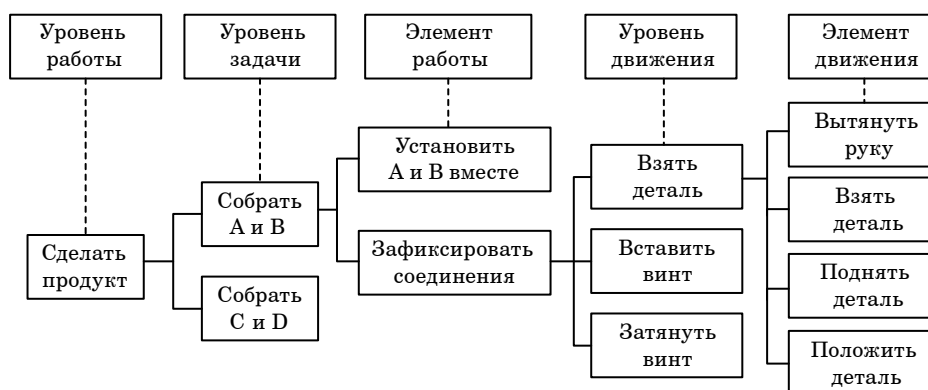
СР основана на движениях работников и последовательности действий, которые могут повторяться. Как правило, эти движения обозначаются

как движения правой руки, левой руки, ноги и т. д. Соответственно, при анализе содержания тех или иных документов важно понимать, с каким уровнем детализации следует разбивать работу. Операционные элементы – это базовые шаги, которые описывают производственные задачи. Каждый элемент представляет собой фиксированный объем работы, который можно изучать и измерять. Основные критерии для выделения элемента – это его завершенность и возможность комбинирования с другими элементами для выполнения полной задачи. Элементы необходимы, чтобы сделать предмет обучения наиболее простым для понимания. По этой причине их представляют в форме «глагол-объект» (рис. 2).

Существует три типа СР, каждый из которых лучше всего подходит для различных ситуаций. Согласно материалам *Toyota Motor Manufacturing Indonesia* (ТММИН) [7], представленным в открытом доступе, тип I в большей степени подходит для производства с постоянным рабочим циклом и содержанием. Тип II – для производства с вариациями, вызванными различными моделями производимых продуктов. Тип III применим к работам с непостоянным содержанием и време-



• Рис. 1. Объекты стандартизированной работы
 • Fig. 1. Objects of standardized work



• Рис. 2. Элементы работы и блок анализа
 • Fig. 2. Work elements and analysis unit

нем выполнения, таким как техническое обслуживание и контроль качества (табл. 1).

Хотя ПСР построена на принципах TPS, в представленных методических материалах «Росатома» [8] типы СР рассмотрены более детально (табл. 2) и структурированы аналогично данным табл. 1. Это особенно важно, поскольку информация о типах СР в открытых источниках из документов TPS недоступна, что делает данные материалы «Росатома» ценным источником для изучения и внедрения принципов СР.

Любой стандарт должен быть легок к восприятию для оператора на рабочем месте и умещаться на одном листе, чтобы при необходимости сверки со стандартом можно было оперативно увидеть все нужные данные. В основном таким документом является стандартная операционная карта (СОК, англ. «Standart Work Chart», SWC; в ПСР – карта СР). В ней отражены схема производственного участка с расположением оборудования, а также ключевые показатели – СТ, ТТ, последовательность операций, НЗП и другая необходимая информация [5, 9].

Резюмируя данные табл. 1; 2, следует выделить ключевые моменты.

Первый тип – это СР, которая представляет собой один и тот же повторяющийся цикл для каждого изделия и чаще всего встречается на сборочной линии или на U-образном обрабатывающем участке, производящем четко определенное семейство изделий. Рабочий процесс спроектирован таким образом, чтобы колебания времени цикла оператора выше или ниже тактового времени были минимальными.

В качестве примера для СР типа I можно рассмотреть процесс механообработки пластиковых деталей, где работа состоит из несколько этапов. Шаг 1 – оператор устанавливает заготовку на станок. Шаг 2 – автоматическая обработка заготовки. Шаг 3 – оператор снимает готовую деталь и кладет ее в контейнер готовой продукции, после чего весь цикл повторяется.

Тип II СР чаще всего имеет короткий, но переменный цикл, что наиболее предпочтительно для движущихся сборочных линий смешанной модели. Вместо того, чтобы весь день производить повторяющуюся серию изделий «А–А–А–А–А», смешанная линия может производить детали «В–А–С–В–А–С–В–С». В отличие от повторяющейся СР типа I, переменная СР вносит определенную степень сложности за счет вариаций. Вместо массового производства конкретной модели продукта переменная СР позволяет стандартизировать несколько продуктов и их вариаций за одну рабочую нагрузку. Из-за множества линеек продуктов и относительно короткого периода времени, в течение которого обычно активны производственные модели, запоминание всех тонкостей каждого процесса для операторов является проблематичным. Соответственно, стандартизация имеет высокую степень значимости.

Данный тип переменной СР будет наиболее предпочтительным для производственной среды с высоким миксом и небольшим объемом продукции (часто меняющихся и коротких работ) и при внедренном вытягивающем производстве (pull production), при котором производство начинается с возникно-

- Таблица 1. Три типа стандартизированной работы TPS
- Table 1. Three types of TPS standard work

	Тип I	Тип II	Тип III
Процесс	Повторяющееся время цикла с практически одинаковым содержанием работы для каждой части	Повторяющееся время цикла, но с вариациями, связанными с комбинацией моделей и объемов	Виды работ, где сложнее определить время и цикличность. Для вырисовки цикличности нужны более длительные временные отрезки
Пример	Механообработка; пластиковые детали; сварка; сборка	Сборка; окраска; сварка; машинная сборка и т. п.	Смена инструментов, проверки качества, замена штампов, погрузка и разгрузка деталей и т. д.
Цель	Время такта четко установлено: $CT = TT$	Может быть выражена взвешенным средним временем цикла (Weighted Average Cycle Time): $WACT = TT$	Полная рабочая смена = = время работы/смена
Документация	1. Лист мощности производства (PCS). 2. Таблица комбинации стандартной работы (SWCT). 3. Стандартная операционная карта (SWC)	1. Лист последовательности работы (PES). 2. Таблица комбинации стандартной работы (SWCT). 3. График Yamazumi. 4. Стандартная операционная карта (SWC)	1. Лист единицы работы (Work Unit Sheet). 2. График Yamazumi. 3. Лист анализа операций

- Таблица 2. Три типа стандартизированной работы ПСР
- Table 2. Three types of PSR Standard Work

	Тип I	Тип II	Тип III
Процесс	Применяется для процессов с повторяющимися операциями. Используется три основные составляющие (время такта (ТТ), последовательность выполнения операций и стандартный запас (НЗП))	Для процессов этого типа возможно вычислить время такта. Применяется в процессах с содержанием операций, отличающихся в зависимости от типа производимого изделия	Время такта для процессов данного типа вычислить невозможно. Применяется в процессах, где работу невозможно выполнять в соответствии с временем такта. Работа в подобных процессах начинается по сигналу «Андон»
Цех	Обрабатывающая линия с наличием ручных операций	Сборка, покраска, сварка, подсорбка и пр. Основное применение – операции с использованием конвейера	Замена режущей оснастки, контроль качества. Переналадка, транспортировка и пр. К типу III можно отнести и длиннопериодические обработки
Предварительные условия	Производство изделий в соответствии с временем такта; выровненное производство; почти отсутствует продукция низкого качества		Невозможно выполнение работ в соответствии с временем такта, но частота работ определена. В рамках одного дня работа является повторяющейся
Стандарт расчета объема работ	ТТ	ТТ	Установленное время работы
Ключевые моменты	Идеал: время цикла (СТ) = ТТ	Идеал: СТ (средневзвешенное) = ТТ	Идеал: общая загрузка = = установленное время работы
Документы	Лист производственных мощностей; объединенная таблица стандартизированной работы; карта стандартизированной работы*	Таблица пооперационного описания работы; инструкции по последовательности выполнения операций; объединенная таблица стандартизированной работы; диаграмма рабочей загрузки*; карта стандартизированной работы*	Таблица пооперационного описания работы; сводная таблица операций; диаграмма рабочей загрузки*

* – документ должен быть размещен непосредственно на рабочей площадке процесса.

вением спроса на рынке или с возникновением вакуума в буферных запасах [10]. Это обусловлено необходимостью гибко реагировать на клиентские запросы, применяя СР, отвечающую их гибкости.

В качестве примера типа III можно привести техническое обслуживание станков. Этот процесс включает в себя проверку и замену изношенных деталей, настройку оборудования и выполнение профилактических процедур. Циклы работы будут варьироваться в зависимости от состояния оборудования и необходимости ремонта. Также, как отмечено в табл. 1; 2, для данного типа СР наиболее подходящим будет производство крупносерийной продукции, в котором будут задействованы несколько рабочих команд в течение длительного срока с периодической сменой инструмента и транспортировкой заготовок/деталей между несколькими рабочими зонами. Несмотря на переменчивую случай-

ную работу и факторы, которые могут показаться неконтролируемыми в рамках работы с длинным циклом, каждая форма СР должна иметь согласованное время цикла и время такта.

Заключение

Внедрение СР осуществляется через ее разработку и установление, а постоянное улучшение – через последующее внесение в нее изменений. При соблюдении принципов СР и обнаружении отклонений в результатах работы можно легко выявить причину и определить пути улучшения и местонахождение проблем. Применение определенного типа СР позволяет выделить оптимальный уровень загрузки операторов и применяемого оборудования, максимально соответствующий потребительскому спросу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Производственная система «Росатома». URL: <https://www.rosatom.ru/about/system/> (дата обращения: 01.06.2024).
2. ГОСТ Р 56020-2020. Бережливое производство. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2020.
3. ГОСТ Р 56908-2016. Бережливое производство. Стандартизация работы. М.: Стандартинформ, 2016.
4. ГОСТ Р 56407-2023. Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. М.: Стандартинформ, 2023.
5. *Золотухин К. В.* Анализ подходов к описанию технологических процессов, применяемых в бережливом производстве и ЕСТД // *Качество и жизнь*. 2023. № 4 (40). С. 58–65. Doi: 10.34214/2312-5209-2023-40-4-58-65.
6. 1989 TPS handbook – standardized work. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/1989-tps-handbook-standardized-work-mark-warren> (дата обращения: 03.06.2024).
7. Jishuken standart work. <https://www.slideshare.net/slideshow/jishuken-standart-work/17203991> (дата обращения: 01.06.2024).
8. Методические рекомендации по методам и инструментам ПСР. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/jishuken-standart-work/17203991> (дата обращения: 06.06.2024).
9. Стандартизированная работа / Ин-т комплекс. стратег. исслед.; группа разработчиков изд-ва Productivity Press. М.: Ин-т комплекс. стратег. исслед, 2014. 134 с.
10. *Doe J., Smith J.* The four types of standardized work in manufacturing. URL: <https://vksapp.com/blog/4-types-standard-work> (дата обращения: 10.06.2024).

REFERENCES

1. Rosatom production system. Available from: <https://www.rosatom.ru/about/system/> [Accessed 1 June 2024].
2. GOST R 56020-2020. Lean production. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russ.).
3. GOST R 56908-2016. Lean production. Work standardization. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.).
4. GOST R 56407-2023. Lean production. Basic tools and methods of use. Moscow: Standartinform; 2023. (In Russ.).
5. Zolotukhin K. V. Analysis of approaches to describing technological processes used in lean production and ESTD. *Quality and Life*. 2023;(4(40)):58–65. (In Russ.). Doi: 10.34214/2312-5209-2023-40-4-58-65.
6. 1989 TPS handbook – standardized work. Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/1989-tps-handbook-standardized-work-mark-warren> [Accessed 3 June 2024].
7. Jishuken standard work. Available from: <https://www.slideshare.net/slideshow/jishuken-standart-work/17203991> [Accessed 1 June 2024].
8. Methodological recommendations on PSR methods and tools. Available from: <https://www.slideshare.net/slideshow/jishuken-standart-work/17203991> [Accessed 6 June 2024].
9. Institut kompleksnykh strategicheskikh issledovaniy; Productivity Press Development Team. Standartizirovannaya rabota. Moscow: Institut kompleksnykh strategicheskikh issledovaniy; 2014. 134 p. (In Russ.).
10. Doe J., Smith J. The four types of standardized work in manufacturing. Available from: <https://vksapp.com/blog/4-types-standard-work> [Accessed 10 June 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Золотухин Кирилл Вячеславович, аспирант, ассистент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизация производственных систем, реинжиниринг технологических процессов, управление изменениями производственных систем.

Поступила в редакцию 10.06.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Zolotukhin Kirill V., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automation of production systems, process re-engineering, change management of production systems.

Received 10.06.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 26.07.2024

Идентификация несоответствий в процессе входного контроля с помощью технологии компьютерного зрения

Валентина Михайловна Милова¹

milovavalentina@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4567-4271, SPIN-код: 7165-7699

Ксения Александровна Вагенлейтер¹

✉ vagenleiter.xenia@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В современной производственной среде качество входящего сырья и материалов напрямую влияет на безопасность конечной продукции. Статья посвящена анализу применения технологии компьютерного зрения для идентификации и классификации несоответствий на этапе входного контроля. Разработаны инновационные алгоритмы поиска решений при обнаружении производственных несоответствий, включающие в себя обнаружение дефектов с помощью технологии компьютерного зрения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, контроль качества, идентификация несоответствий, входной контроль, алгоритмы компьютерного зрения, классификация дефектов, сверточные нейронные сети

Для цитирования: Милова В. М., Вагенлейтер К. А. Идентификация несоответствий в процессе входного контроля с помощью технологии компьютерного зрения // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 45–50. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-45-50.

Original article

Identification of nonconformities in the process of incoming inspection with the help of computer vision technology

Valentina M. Milova¹

milovavalentina@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4567-4271, SPIN-code: 7165-7699

Ksenia A. Vagenleiter¹

✉ vagenleiter.xenia@yandex.ru

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. In modern production environment the quality of incoming raw materials and materials directly affects the safety of the final products. The article is devoted to the application of computer vision technology for identification and classification of nonconformities at the stage of incoming inspection. Innovative algorithms of search of decisions at detection of production nonconformities including application of detection of defects with the help of computer vision technology are developed.

Keywords: computer vision, quality control, identification of nonconformities, incoming inspection, computer vision algorithms, classification of defects, convolutional neural networks

For citation: Milova V. M., Vagenleiter K. A. Identification of nonconformities in the process of incoming inspection with the help of computer vision technology. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):45–50. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-45-50.

Введение

В современной производственной среде входной контроль играет ключевую роль в обеспечении высокого уровня качества конечной продукции. Своевременное выявление и устранение несоответствий на начальных этапах производства позволяют предотвратить дальнейшее распространение дефектов в производственном процессе. Традиционные подходы

к обеспечению качества на входном контроле требуют временных и трудовых затрат. В этом контексте современные подходы позволяют радикально трансформировать процесс идентификации несоответствий с помощью автоматизации и роботизации производственных процессов. В настоящей статье рассмотрена технология компьютерного зрения, выступающая в роли инновационного подхода для улучшения процесса входного контроля.

Материал и методы исследования

Важность точной и своевременной идентификации несоответствий на этапе входного контроля подтверждает необходимость применения эффективных методов обеспечения качества. В контексте данного подхода был разработан алгоритм поиска решений для проблемы несоответствий на входном контроле (рис. 1), который представляет собой современный инструмент управления качеством, предназначенный для последовательного решения локальных задач. Предлагаемый подход обеспечивает понимание причин несоответствий и способствует разработке целенаправленных мер по их устранению.

Для максимального раскрытия потенциала алгоритма с интеграцией современных инструментов управления в него внедрена технология компьютерного зрения, которая позволяет автоматизировать сбор и анализ входящей информации о сырье, обеспечивая точность и оперативность выявления несоответствий, включая их классификацию.

Необходимые уточняющие этапы в рамках разработанного алгоритма:

1) первый этап алгоритма начинается с определения проблемы несоответствий на входном контроле;

2) далее проводится анализ причин возникновения выявленного несоответствия;

3) в случае, если причины несоответствий неизвестны, применяется инструмент управления качеством – метод «5 почему», позволяющий понять первопричину проблемы;

4) далее оценивается эффективность текущих методов контроля качества. Если они не обеспечивают достаточной точности в выявлении критических несоответствий, рассматривается внедрение альтернативных методов, включая технологию компьютерного зрения;

5) в случае положительной оценки результатов технологии и наличия соответствующих ресурсов инициируются ее разработка и пилотирование;

6) заключительный этап включает в себя внедрение технологии компьютерного зрения на соответствующие этапы производства.

Развертывание технологии компьютерного зрения и поэтапный анализ применения сверточных нейронных сетей для оценки качества изображений реализованы дополнительным алгоритмом (рис. 1).

Сверточные нейронные сети являются передовым инструментом в области компьютерного зрения, отличаются высокой точностью в задачах классификации и анализа изображений.

Использование компьютерного зрения позволяет не только идентифицировать наличие дефектов на изображениях сырья, но и оценить степень их влияния на качество конечного продукта, что дает возможность более точно определить пригодность сырья для производственного процесса и повысить качество конечной продукции [1–4].

Для практического применения и оценки результативности разработанного алгоритма проведено исследование, направленное на классификацию и идентификацию дефектов, связанных с деградацией зерен ячменя, используемых в качестве сырья в пивоваренной промышленности. Данная задача является особенно актуальной для пищевой отрасли, так как некачественные сельскохозяйственные культуры оказывают значительное негативное влияние на всю пищевую цепочку производственных процессов.

Приведем необходимые уточнения к рис. 2.

1. Алгоритм начинается с импорта специализированных библиотек обработки изображений и машинного обучения.

2. Далее, используя функции загрузки и обработки изображений, алгоритм подготавливает выборку зерен ячменя для дальнейшего анализа.

3. Следующий шаг включает в себя разделение изображений на идеальные и дефектные с присвоением меток классов 0 и 1 соответственно.

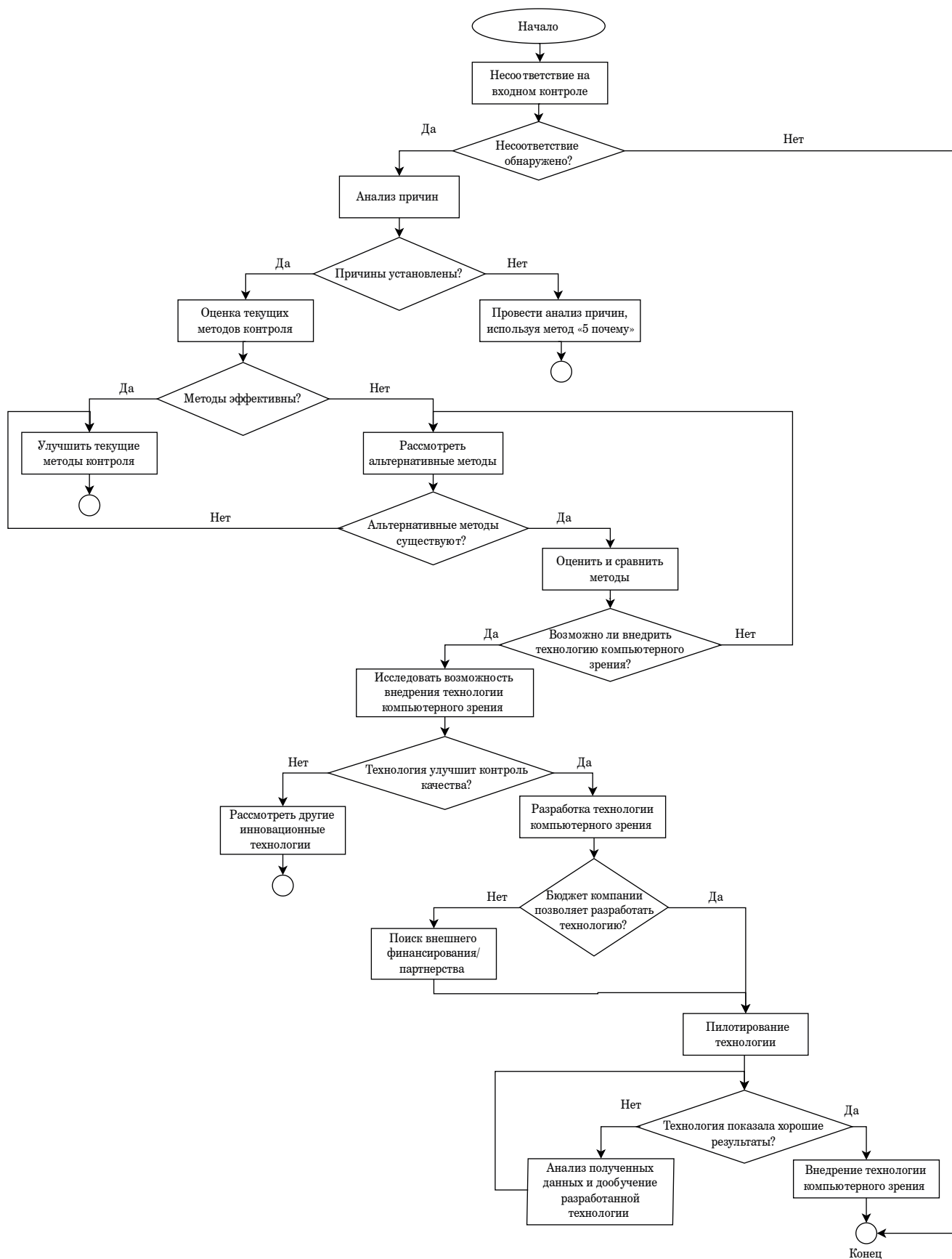
4. Для извлечения признаков и классификации изображений на этапе создания модели сверточной нейронной сети определяется ее структура, включающая в себя процессы слоев свертки, пулинга и активации.

5. На этапе компиляции модели выбирается оптимизатор, который обновляет веса модели и уменьшает функцию потерь.

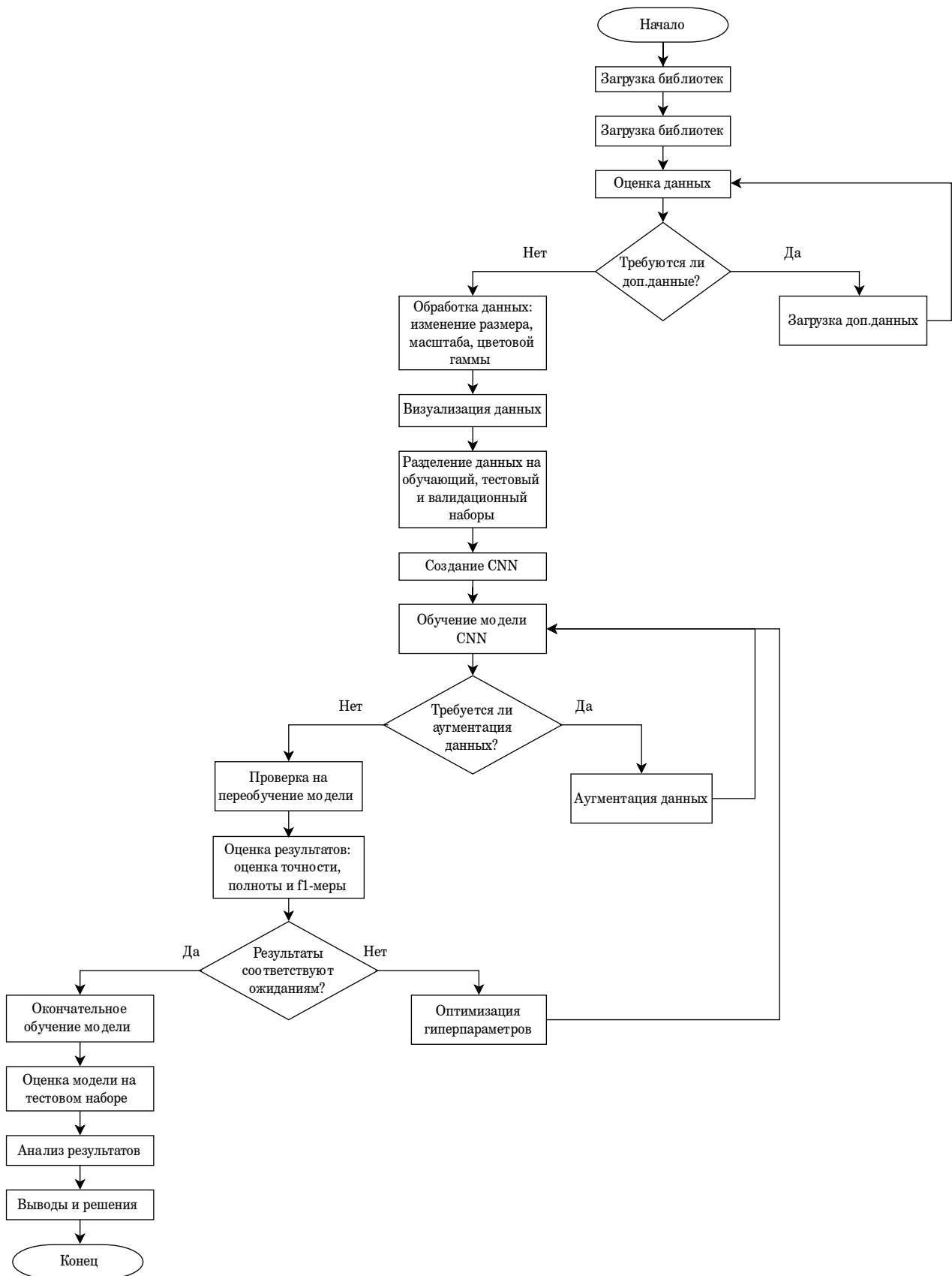
6. Далее проходит процесс обучения модели на подготовленных данных в течение нескольких эпох, после чего проводится оценка их производительности на валидационном наборе данных.

7. Заключительные этапы включают в себя вывод результатов классификации идеальных и дефектных изображений, визуализацию точности модели, матрицу ошибок и ROC-кривые, демонстрирующие результативность применения компьютерного зрения для решения проблемы деградации зерна ячменя.

Для наглядной демонстрации эффективности разработанной модели технологии компьютерного зрения на рис. 3 показаны результаты классификации выборки изображений зерен ячменя. Модель способна точно различать качественное сырье от сырья с признаками деградации, выражающимися в изменении цвета, формы, наличии плесени и повреждений. Полученные результаты



• Рис. 1. Алгоритм поиска решений для проблемы несоответствия на входном контроле
 • Fig. 1. Algorithm for finding solutions to the problem of nonconformity on input control



• Рис. 2. Алгоритм применения сверточных нейронных сетей для оценки качества изображений
 • Fig. 2. Algorithm of applying convolutional neural networks for image quality assessment



• Рис. 3. Результаты классификации построенной модели на примерах идеальных и дефектных изображений зерен ячменя

• Fig. 3. Classification results of the constructed model on examples of ideal and defective images of barley grains

подтверждают потенциал использования технологий компьютерного зрения в процессах контроля качества в пищевой промышленности и не только.

Заключение

В результате анализа потенциала применения современных методов обеспечения качества, а

именно – технологии компьютерного зрения, для процесса входного контроля на примере проблемы деградации зерна ячменя в пищевой отрасли следует отметить, что разработанные алгоритмы позволяют идентифицировать и классифицировать дефекты с высокой точностью, что является ключевым показателем для обеспечения должного уровня качества и безопасности конечной продукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Винокур А. И.* Искусственный интеллект. Свойства зрительного восприятия и компьютерное зрение // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика. Технологическое лидерство: взгляд за горизонт: Материалы IV Междунар. науч. форума / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Гос. ун-т управления. М., 2021. С. 184–188.
2. *Жерон О.* Прикладное машинное обучение с помощью Scikit Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты, и техники для создания интеллектуальных систем. СПб.: Диалектика, 2020. 1040 с.
3. *Федотов Д. В., Попов Е. А., Охорзин В. А.* Оптимизация структуры сверточной нейронной сети с помощью самоконфигурируемого эволюционного алгоритма в одной задаче идентификации // Вестн. СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 857–863.
4. *Шолле Ф.* Глубокое обучение на Python. 2-е междунар. изд. СПб.: Питер, 2023. 576 с.

REFERENCES

1. Vinokur A. I. Artificial Intelligence. Properties of visual perception and computer vision. Step into the future: artificial intelligence and digital economy. Technological leadership: a look beyond the horizon: Materials of the IV International scientific forum; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, State University of Management. Moscow; 2021, pp. 184–188. (In Russ.).
2. Giron O. Applied machine learning with scikit learn, keras and tensorflow: concepts, tools, and techniques for creating intelligent systems. SPb.: Dialectics; 2020. 1040 p. (In Russ.).
3. Fedotov D. V., Popov E. A., Ohorzin V. A. Optimization of the convolutional neural network structure using a self-configurable evolutionary algorithm in one identification problem. Vestnik SibGAU. 2015;16(4):857–863. (In Russ.).
4. Scholle F. Deep Learning in Python. 2nd international ed. SPb.: Piter; 2023. 576 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Милова Валентина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – сложные системы, принятие управленческих решений, нечеткие множества.

Вагенлейтер Ксения Александровна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ, методы и инструменты управления качеством, нейронные сети.

Поступила в редакцию 12.06.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Milova Valentina M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – complex systems, management decision making, fuzzy sets.

Vagenleiter Ksenia A., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis, quality management methods and tools, neural networks.

Received 12.06.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 26.07.2024

Рефрактометрический контроль оптически мутных жидкофазных сред экспериментальной установкой

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы исследования оптически мутных жидкофазных сред с применением метода полного внутреннего отражения. Для анализа оптически мутных жидкофазных сред перспективно и актуально применять оптические технологии, в частности, рефрактометрические методы и технические средства, так как они являются высокоинформативными, высокоточными и достоверными инструментами исследований. Цель работы – изучение оптических параметров оптически мутных жидкофазных сред в пищевой промышленности экспериментальной рефрактометрической установкой. Получены зависимости показателя преломления водных растворов яблочного сока от концентрации, а также определена сходимость экспериментальных и заводских данных для длины волны $\lambda = 633$ нм.

Ключевые слова: рефрактометрическая установка, оптически мутная среда, показатель преломления, концентрация, полином, сходимость, погрешность измерения

Для цитирования: Майоров Е. Е. Рефрактометрический контроль оптически мутных жидкофазных сред экспериментальной установкой // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 51–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-51-55.

Original article

Refractometric control of optically cloudy liquid-phase media by an experimental setup

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper considers the issues of studying optically cloudy liquid-phase media using the method of total internal reflection. For the analysis of optically turbid liquid-phase media, it is promising and relevant to use optical technologies, in particular, refractometric methods and technical means, since they are highly informative, highly accurate and reliable research tools. The purpose of this work – the study of optical parameters of optically turbid liquid-phase media in the food industry with an experimental refractometric installation. The dependences of the refractive index of aqueous solutions of apple juice on the concentration are obtained, and the convergence of experimental and factory data for the wavelength $\lambda = 633$ nm was determined.

Keywords: refractometric installation, optically cloudy medium, refractive index, concentration, polynomial, convergence, measurement error

For citation: Maiorov E. E. Refractometric control of optically cloudy liquid-phase media by an experimental setup. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):51–55. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-51-55.

Введение

Оптико-электронные рефрактометрические приборы и комплексы для мониторинга и контроля широко используются в экологии, медицине, биологии, машиностроении, химической и пищевой промышленности как в зарубежной, так и в российской практике [1]. Для исследования оптически мутных сред в пищевой промышленности перспективно и актуально применять оптические технологии, в частности, рефрактометрические методы и технические средства [2].

Анализ научных литературных источников представил следующую картину: практически

везде приведены физико-химические свойства этих веществ, а оптические свойства (показатель преломления, температурный коэффициент показателя преломления, оптическое поглощение и т. д.) требуют уточнения и независимого подтверждения [3]. На сегодняшний день такая информация неполна и противоречива, а порой носит только оценочный характер [4–8].

Для изучения оптических свойств оптически мутных сред в пищевой промышленности современные рефрактометрические приборы общего назначения могут не дать нужного результата, так как эти приборы не имеют соответствующей калибровки для решения поставленных задач.

Более того, программное обеспечение, входящее в состав рефрактометров общего назначения, написано для решения задач общего назначения [9–12]. Внимания заслуживает исследование метрологических возможностей экспериментальной рефрактометрической установки применительно к измерению оптических параметров оптически мутных сред в лабораторных условиях [13–15].

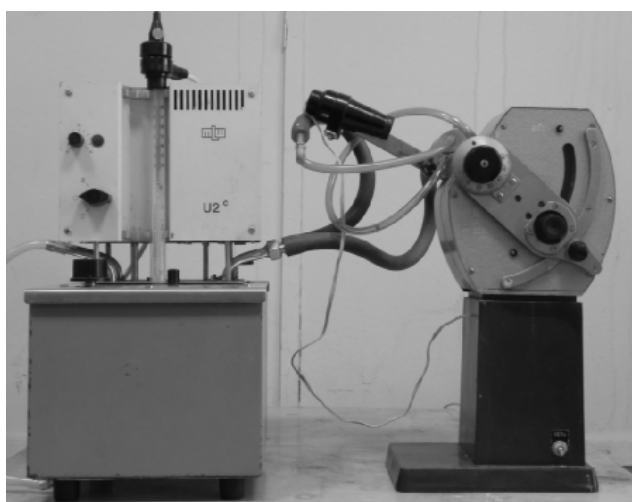
В работе приведено исследование оптически мутных сред экспериментальной рефрактометрической установкой, которая не уступает по технико-эксплуатационным характеристиками зарубежным аналогам.

Цель работы – изучение оптических параметров оптически мутных жидкофазных сред в пищевой промышленности экспериментальной рефрактометрической установкой. С помощью экспериментальной рефрактометрической установки выявить оптические параметры исследуемых проб на длине световой волны $\lambda = 633$ нм.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования стали пробы яблочного сока с разной концентрацией в воде ($k = 1, 3, 5, 7, 10$ %), предоставленные одним из ведущих производителей соковой продукции. Водные растворы взвешивали на сертифицированных электронных весах ВК-300.1 с погрешностью измерений 0,01 г.

Для исследования водных растворов яблочного сока использовали экспериментальную рефрактометрическую установку на основе



• Рис. 1. Внешний вид экспериментальной рефрактометрической установки

• Fig. 1. The appearance of an experimental refractometric installation

- Таблица 1. Технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки
- Table 1. Technical and operational characteristics of the experimental installation

Маркировка модели	УРЛ-1
Шкала измерений	Bx или n
Рабочий диапазон концентраций	0,0–95,0 Brix; 1,2000–1,7000
Чувствительность	–
Воспроизводимость результатов измерений	$(\pm 0,1) Bx$; $(\pm 0,0001) n$
Погрешность измерений	$(\pm 0,1) Bx$; $(\pm 0,0002) n$
Материал кюветной камеры	Нерж. сталь
Призма	Стекло ТФ2
Термооптическая постоянная dn/dT ($\lambda = 633$ нм) призмы	$0,5 \cdot 10^{-5} 1/^\circ C$
Температурный диапазон автоматической компенсации	–
Минимальный объем пробы	0,2 мл
Время измерения	–
Габаритные размеры, мм	400×180×260
Масса, не более, кг	7,5
Вывод данных измерений	Глаз наблюдателя
Температурный диапазон эксплуатации, $^\circ C$	+5...+40
Температурный режим хранения и транспортировки, $^\circ C$	-20...+50

рефрактометра АББЕ с термостатом (рис. 1). На данной экспериментальной установке измеряли показатель преломления водных растворов яблочного сока при концентрациях $k = 1, 3, 5, 7, 10$ % и $T = 22$ $^\circ C$ на длине волны $\lambda = 633$ нм. Погрешность измерений составляла $\Delta n = (\pm 0,0002)$. Технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки приведены в табл. 1.

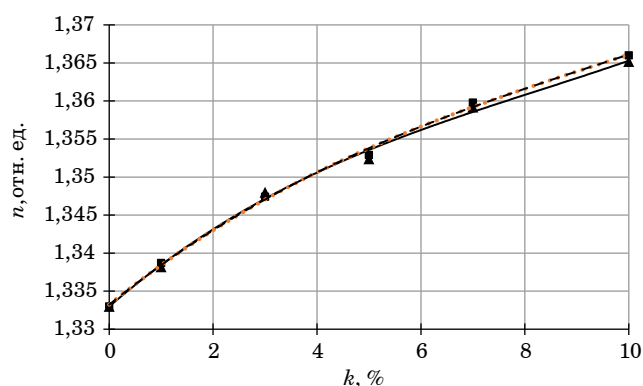
Результаты эксперимента

Полученные экспериментальные данные измерений концентрационной зависимости показателя преломления водных растворов яблочного сока $n_{\text{экс}}(k)$ были сопоставлены с предоставленными заводскими данными $n_{\text{зав}}(k)$.

Эксперимент показал, что зависимости $n(k)$ в растворах яблочного сока имеют сходимость $\Delta n = 0,0008$ (рис. 3).

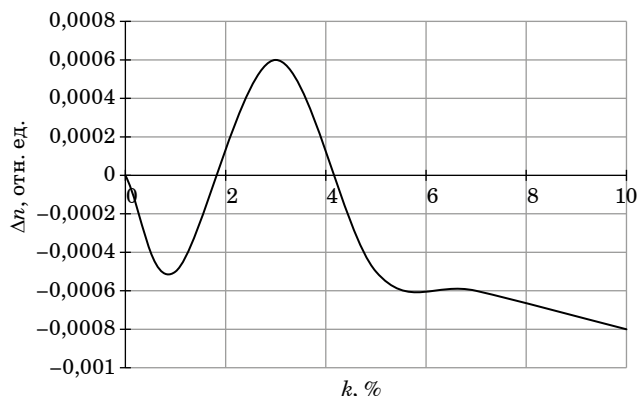
- Таблица 2. Экспериментальные результаты $n_{\text{эксп}}(k)$ и заводские $n_{\text{зав}}(k)$ в растворах яблочного сока
- Table 2. Experimental results of $n_{\text{эксп}}(k)$ and factory $n_{\text{зав}}(k)$ in apple juice solution

Концентрация k , %	Показатель преломления $n_{\text{эксп}}$	Показатель преломления $n_{\text{зав}}$	$\Delta n = n_{\text{эксп}} - n_{\text{зав}}$
0	1,3330	1,3330	0
1	1,3382	1,3387	-0,0005
3	1,3480	1,3474	0,0006
5	1,3524	1,3529	-0,0005
7	1,3592	1,3598	-0,0006
10	1,3652	1,3660	-0,0008



- Рис. 2. Зависимость показателя преломления от массовой концентрации яблочного сока в водном растворе: треугольник – экспериментальные результаты ($n_{\text{эксп}}$), квадрат – заводские данные ($n_{\text{зав}}$)
- Fig. 2. The dependence of the refractive index on the mass concentration of apple juice in an aqueous solution: triangle – experimental results ($n_{\text{эксп}}$), square – factory data ($n_{\text{зав}}$)

На рис. 2 видно, что распределения экспериментальных и заводских данных нелинейны и могут интерполированы полиномами третьей степени. Итак, кривые представлены полиномами третьей степени, которые имеет вид:



- Рис. 3. Сходимость результатов измерения $n_{\text{эксп}}(k)$ и заводских данных $n_{\text{зав}}(k)$
- Fig. 3. Convergence of the measurement results of the $n_{\text{эксп}}(k)$ and the factory data of the $n_{\text{зав}}(k)$

$$n_{\text{зав}} = 0,00001k^3 - 0,0003k^2 + 0,0055k + 1,3332,$$

где величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9982$;

$$n_{\text{эксп}} = 0,00002k^3 - 0,0004k^2 + 0,0059k + 1,333,$$

где величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9966$.

Заключение

Полученные данные измерений концентрационной зависимости показателя преломления водных растворов яблочного сока представляют интерес как для оптического приборостроения, так и для производителей соковой продукции. Эксперимент показал, что контроль в лабораторных условиях оптически мутных жидкофазных сред российской рефрактометрической установкой не хуже, чем на самом производстве зарубежными рефрактометрическими датчиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. М.: ФизматГИЗ, 1970. 822 с.
2. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1983. 352 с.
3. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
4. Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве / В. В. Курлов [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1–12. Doi: 10.25791/pribor.2.2021.1237.
5. Экспериментальное исследование разработанного автоматизированного рефрактометра для контроля химически агрессивных сред / О. В. Громов [и др.] // Науч. обозрение. Техн. науки. 2021. № 3. С. 21–26.
6. Применение рефрактометра для контроля напитков торговой марки «LIPTON» / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. техн. науки. 2021. Вып. 6. С. 170–175. Doi: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.

7. Использование рефрактометрии для обеспечения предполетной подготовки воздушных судов / Ю. Ю. Михальчевский [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 1–7. Doi: 10.25791/pribor.10.2021.1294.
8. Оптико-электронный контроль противообледенительных жидкостей для обработки воздушных судов / Ю. Ю. Михальчевский [и др.] // Известия Тульского гос. университета. Техн. науки. 2021. Вып. 10. С. 170–175. Doi: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
9. Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронным рефрактометром / Ю. Ю. Михальчевский [и др.] // Науч. приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 88–101.
10. Рефрактометрические средства контроля водных растворов тетрахлорэтилена / А. В. Арефьев [и др.] // Науч. приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 75–83.
11. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина / О. В. Громов [и др.] // Известия высших учеб. завед. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 343–349. Doi: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.
12. Майоров Е. Е. Призмная рефрактометрия измерения оптических характеристик каустизационного щелока // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всерос. науч. конф. (СПб., 18–22 апр. 2022 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2022. С. 59–61. Doi: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.
13. Рефрактометрические методы и средства контроля этанола, пропанола и их водных растворов / А. В. Арефьев [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 594–601. Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601.
14. Рефрактометрический контроль веществ жидкого агрегатного состояния в пищевой промышленности / Е. Е. Майоров [и др.] // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2023. Вып. 8. С. 269–274. Doi: 10.24412/2071-6168-2023-8-269-270.
15. Рефрактометрический контроль состава сухого остатка лактицинии в реальном производстве / Е. Е. Майоров [и др.] // Приборы. 2023. № 9. С. 10–14.

REFERENCES

1. Shishlovsky A. A. Applied physical optics. Moscow: FizmatGIZ; 1970. 822 p. (In Russ.).
2. Ioffe B. V. Refractometric methods of chemistry. Leningrad: Chemistry; 1983. 352 p. (In Russ.).
3. Yakushenkov Yu. G. Theory and calculation of optoelectronic devices. Moscow: Logos; 1999. 480 p. (In Russ.).
4. Kurlov V. V., Gromov O. V., Tayurskaya I. S., Maiorov E. E., Arefyev A. V., Guliyev R. B. Application of the developed refractometric sensor in food production. Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2021;(2):1–12. (In Russ.). Doi: 10.25791/pribor.2.2021.1237.
5. Gromov O. V., Maiorov E. E., Tayurskaya I. S., Mashek A. Ch., Tsygankova G. A., Udakhina S. V. Experimental study of the developed automated refractometer for the control of chemically aggressive media. Scientific Review. Technical sciences. 2021;(3):21–26. (In Russ.).
6. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Gromov O. V., Guliyev R. B., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. The use of a refractometer for the control of beverages of the LIPTON trademark. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021;(6):170–175. (In Russ.). Doi: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
7. Mikhalevsky Yu. Yu., Kostin G. A., Maiorov E. E., Arefyev V. V., Guliyev R. B., Dagaev A. V. The use of refractometry to ensure pre-flight training of aircraft. Instruments and systems. Management, control, diagnostics. 2021;(10):1–7. (In Russ.). Doi: 10.25791/pribor.10.2021.1294.
8. Mikhalevsky Yu. Yu., Kostin G. A., Maiorov E. E., Kurlov V. V., Guliyev R. B., Dagaev A. V. Optoelectronic control of de-icing liquids for aircraft processing. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021;(10):170–175. (In Russ.). Doi: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
9. Mikhalevsky Yu. Yu., Kostin G. A., Maiorov E. E., Arefyev V. V., Khokhlova M. V., Udakhina S. V. Investigation of de-icing liquid with an optoelectronic refractometer. Scientific instrumentation. 2021;31(4):88–101. (In Russ.).
10. Arefyev A. V., Guliyev R. B., Gromov O. V., Dagaev A. V., Kurlov V. V., Maiorov E. E., Tayurskaya I. S. Refractometric means of control of aqueous solutions of tetrachloroethylene. Scientific instrumentation. 2022;32(2):75–83. (In Russ.).
11. Gromov O. V., Guliyev R. B., Chernyak T. A., Maiorov E. E., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. Application of the full internal reflection method for the study of liquid-phase media based on botulinum toxin. Journal of instrument engineering. 2022;65(5):343–349. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.
12. Maiorov E. E. Prismatic refractometry for measuring the optical characteristics of caustic liquor. Modeling and situational quality management of complex systems: The Third All-Russian scientific conference (SPb., 18–22 April 2022). SPb.: SUAI; 2022, pp. 59–61. (In Russ.). Doi: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

13. Arefyev A. V., Afanasyeva O. V., Dagaev A. V., Kurlov V. V., Maiorov E. E., Tayurskaya I. S. Refractometric methods and means of control of ethanol, propanol and their aqueous solutions. *Journal of instrument engineering*. 2023;66(7):594–601. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601.
14. Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. Refractometric control of substances of liquid aggregate state in the food industry. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2023;(8):269–274. (In Russ.). Doi: 10.24412/2071-6168-2023-8-269-270.
15. Maiorov E. E., Arefyev A. V., Guliev R. B., Pushkina V. P., Tsygankova G. A. Refractometric control of lacticinia dry residue composition in real production. *Instruments*. 2023;(9):10–14. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Поступила в редакцию 07.05.2024

Поступила после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Received 07.05.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 26.07.2024

Исследование экспериментальной интерференционной установки на базе интерферометра Жамена для измерения смещения точек поверхности

Евгений Евгеньевич Майоров¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-код: 8599-8975

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена измерению амплитуды выходного сигнала при изменении угла между пластинами при разной толщине в интерферометре Жамена, а также определению чувствительности установки для различных величин смещения точек поверхности объекта. С появлением современной интерференционной аппаратуры исследователи достигли больших успехов в регистрации, обработке и анализе полученных данных, однако не решены все проблемы в конструкторской части интерференционных приборов и систем, поэтому исследование актуально и перспективно. Приведены схема взаимодействия световых лучей, прошедших стеклянные пластины интерферометра, а также оптическая схема интерференционной установки контроля элементарных смещений. Получены зависимости амплитуды выходного сигнала от угла между стеклянными пластинами и калибровочные кривые экспериментальной интерференционной установки для различной толщины пластин.

Ключевые слова: оптические методы, интерферометрия, плоскопараллельные пластины, калибровочная кривая, чувствительность, разность хода лучей, толщина пластины

Для цитирования: Майоров Е. Е. Исследование экспериментальной интерференционной установки на базе интерферометра Жамена для измерения смещения точек поверхности // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 56–60. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-56-60.

Original article

Investigation of an experimental interference installation based on the Jamin interferometer for measuring the displacement of surface points

Evgeny E. Maiorov¹

✉ majorov_ee@mail.ru, orcid.org/0000-0002-7634-1771, SPIN-code: 8599-8975

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This work is devoted to measuring the amplitude of the output signal when the angle between the plates changes at different thicknesses in the Jamin interferometer, as well as determining the sensitivity of the installation for various values of displacement of points on the surface of the object. With the advent of modern interference equipment, researchers have achieved great success in recording, processing and analyzing the data obtained, however, all problems in the design of interference devices and systems have not been solved, so the work is relevant and promising. A diagram of the interaction of light rays passing through the glass plates of the interferometer, as well as an optical scheme of an interference installation for monitoring elementary displacements, is presented. The dependences of the output signal amplitude on the angle between the glass plates and the calibration curves of the experimental interference setup for different plate thicknesses are obtained.

Keywords: optical methods, interferometry, plane-parallel plates, calibration curve, sensitivity, beam path difference, plate thickness

For citation: Maiorov E. E. Investigation of an experimental interference installation based on the Jamin interferometer for measuring the displacement of surface points. *Innovacionnoe priboroostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):56–60. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-56-60.

Введение

Совершенствование оптических методов измерений влечет за собой развитие высокотехнологичных методов производства, технических средств научных исследований [1, 2]. Эти методы и средства измерений позволяют достигать до-

стоверных, надежных, наглядных результатов эксперимента [3, 4]. Среди всего многообразия оптических методов наиболее универсальными методами исследований являются интерференционные методы и средства [5, 6]. Они позволяют решать различные сложные задачи, такие как контроль поверхностей прецизионной оптики,

исследования напряженно-деформированных поверхностей, анализ различной сложности интерферограмм.

Интерферометрия всегда являлась высокоинформативным, высокоточным и надежным измерительным инструментом [7, 8]. Важность интерферометрических методов обусловлена ее возможностями, такими как исследование статистических и динамических процессов волновых фронтов, проведение сравнительного анализа профиля волнового фронта в разные моменты времени, получение количественных и качественных данных об исследуемом объекте, а также трехмерных изображений изучаемого объекта [9, 10].

С появлением современной интерференционной аппаратуры исследователи достигают больших успехов в регистрации, обработке и анализе полученных данных. С развитием компьютерных технологий информацию об изучаемом объекте можно представлять в графической форме, массивом данных для удобства пересчета [11, 12].

Однако нет оснований утверждать, что решены все проблемы в конструкторской части интерференционных приборов и систем. Многие разработчики прикладывают большие усилия для создания таких технических решений, которые позволили бы усовершенствовать технические характеристики (увеличить точность измерений, расширить диапазон определяемых величин и т. д.) [13, 14].

На сегодняшний день существуют проблемы с настройкой интерференционных полос. Например, в технике двухопорной голографии настройка интерференционных полос осуществляется путем моделирования в пространстве одной из опорных световых волн, что приводит к изменению волнового фронта восстановленной волны сравнения, а значит, это деформирование вносит дополнительную погрешность при считывании информации [15, 16].

Поэтому представляет интерес исследование амплитуды выходного сигнала при изменении угла между пластинами интерферометра Жамена и влияния толщины пластин на чувствительность настройки интерференционных полос в экспериментальной интерференционной установке.

Исследование динамической настройки экспериментальной интерференционной установки на базе интерферометра Жамена для контроля элементарных смещений поверхности объекта и определило цель настоящей работы.

Задачи исследования – провести измерения амплитуды выходного сигнала при изменении угла между пластинами при разной толщине в интерферометре Жамена; откалибровать экс-

периментальную интерференционную установку при разных толщинах стеклянных пластин; определить чувствительность установки для различных величин смещения точек поверхности объекта.

Материал и методы исследования

Объектом исследования были плоскопараллельные стеклянные пластины, изготовленные из кварцевого стекла (К8) толщиной 10, 12 и 14 мм, которые использовались в интерферометре Жамена.

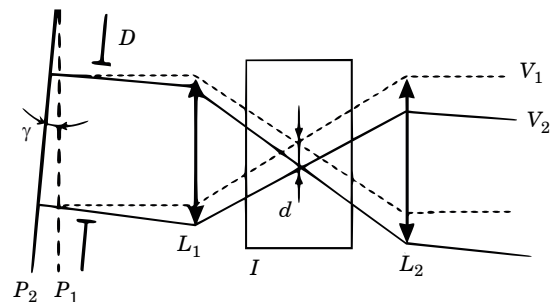
Оптическая схема экспериментальной интерференционной установки для контроля элементарных смещений, где используется интерферометр Жамена, приведена на рис. 1.

Установка предназначена для исследования объектов сложной формой. Для более качественных измерений необходимо проанализировать сигнал на выходе фотоприемника.

Результаты исследования и их обсуждение

Для графического представления параметров выходного сигнала переходили от выражения апертуры фотоприемника в линейном измерении к угловому, как показано в [15, 16]. Итак, окончательно для построения графических зависимостей было получено следующее выражение:

$$u_o^2 = \left[2a^2 \frac{f\lambda}{\pi(d_u - d)} \sin \frac{2\pi\alpha_n(d_i - d)}{\lambda} \right]^2 +$$



• Рис. 1. Оптическая схема интерференционной установки контроля элементарных смещений: P_1, P_2 – элементарные смещения поверхности; L_1, L_2 – собирающие линзы; I – интерферометр Жамена; D – диафрагма; V_1, V_2 – световые лучи; γ – угол отклонения поверхности; d – элементарное смещение

• Fig. 1. Optical scheme of the interference installation for monitoring elementary displacements: P_1, P_2 – elementary surface displacements; L_1, L_2 – collecting lenses; I – Jamin interferometer; D – diaphragm; V_1, V_2 – light rays; γ – surface deflection angle; d – elementary displacement

$$\begin{aligned}
 & + \left[4a^2 \frac{f\lambda}{\pi d_u} \sin \frac{2\pi\alpha_H d_H}{\lambda} \right]^2 + \\
 & + \left[2a^2 \frac{f\lambda}{\pi(d_H + d)} \sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H + d)}{\lambda} \right]^2 + \\
 & + 16a^4 \frac{f^2 \lambda^2}{\pi^2 d_H (d_H - d)} \left[\sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H - d)}{\lambda} \right] \times \\
 & \quad \times \left[\sin \frac{2\pi\alpha_H d_H}{\lambda} \right] \left[\cos \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda} + \right. \\
 & + 8a^4 \frac{f^2 \lambda^2}{\pi^2 (d_H - d)(d_H + d)} \times \sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H - d)}{\lambda} \times \\
 & \times \sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H + d)}{\lambda} \cos \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda} + 16a^2 \frac{f^2 \lambda^2}{\pi^2 d_H (d_H + d)} \times \\
 & \quad \times \sin \frac{2\pi\alpha_H}{\lambda} \sin \frac{2\pi\alpha_H (d_H + d)}{\lambda} \cos \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda} \left. \right],
 \end{aligned}$$

где u_0^2 – амплитуда выходного сигнала; a – амплитуды волн, участвующих в интерференции; f – фокусное расстояние; λ – длина световой волны; α_H – угловая апертура фотоприемника; d_H – смещение, вносимое интерферометром; d – смещение точек поверхности; α_0 – биссектриса апертурного угла наблюдения.

На рис. 2 показана рассчитанная по данной формуле динамика настройки интерферометра: изменение амплитуды выходного сигнала при изменении угла между пластинами интерферометра. Из рис. 2 следует, что чем больше толщина пластин h , тем более высока чувствительность настройки.

На рис. 3 показаны графические зависимости величины угла между пластинами интерферометра (ξ) от разных величин смещения точек поверхности (d).

На рис. 4 кривые построены посредством определения угла ξ при движении объекта.

Результаты измерений хорошо аппроксимируются полиномами третьей степени, которые имеют вид:

1) для смещения на 300 мкм:

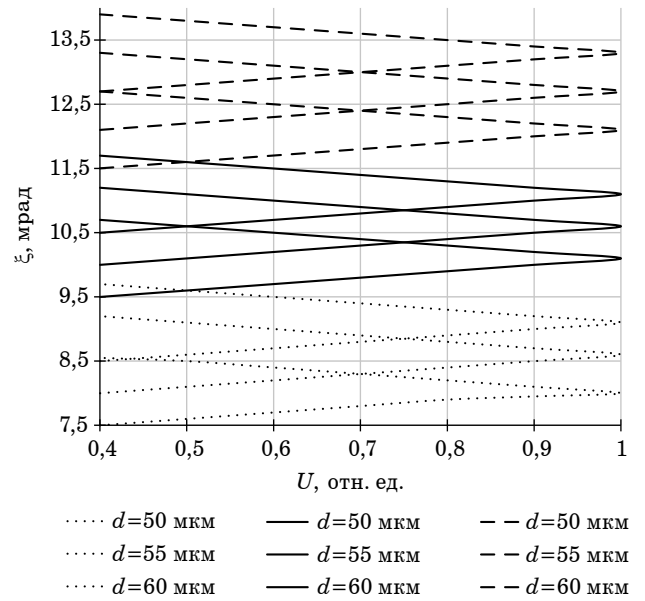
$$h(\xi) = -1 \cdot 10^{-16} \xi^3 + 0,0139 \xi^2 - 0,6944 \xi + 18,556.$$

Значение достоверности аппроксимации для данной кривой: $R^2 = 0,9998$;

2) для смещения на 500 мкм:

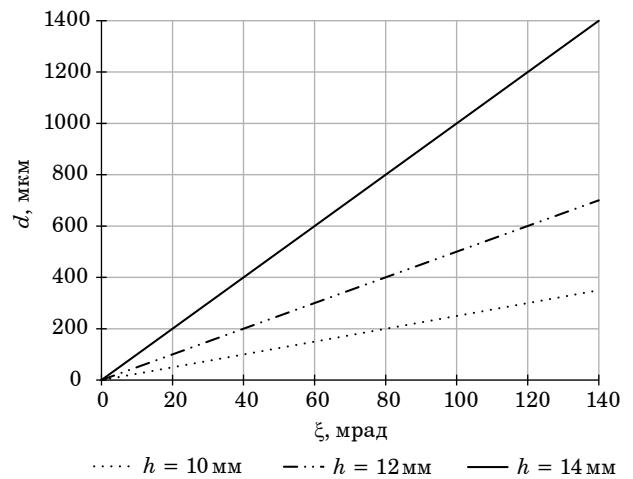
$$h(\xi) = -0,0017 \xi^3 + 0,1076 \xi^2 - 2,375 \xi + 29.$$

Значение достоверности аппроксимации для данной кривой: $R^2 = 0,9996$;



• Рис. 2. Зависимости амплитуды выходного сигнала от угла между стеклянными пластинами: штриховая линия – $h = 10$ мм; сплошная линия – $h = 12$ мм; пунктирная линия – $h = 14$ мм. Диаметры увеличиваются снизу вверх для каждой толщины пластины

• Fig. 2. The dependence of the amplitude of the output signal on the angle between the glass plates: dashed line – $h = 10$ mm; solid line – $h = 12$ mm; dotted line – $h = 14$ mm. The diameters increase from bottom to top for each plate thickness



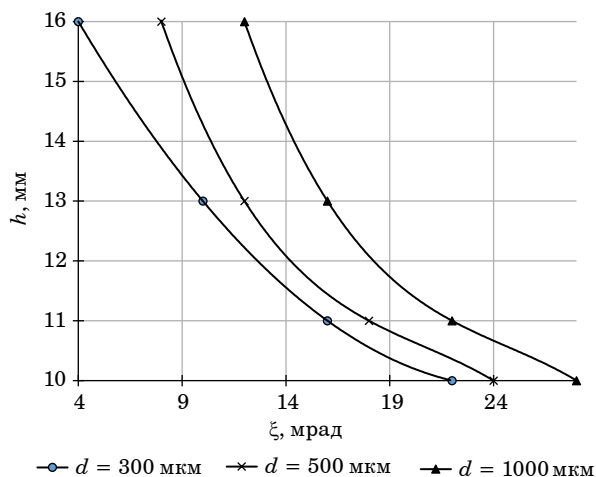
• Рис. 3. Калибровка экспериментальной интерференционной установки для различной толщины пластин

• Fig. 3. Calibration of an experimental interference installation for different plate thicknesses

3) для смещения на 1000 мкм:

$$h(\xi) = -0,0017 \xi^3 + 0,1285 \xi^2 - 3,3194 \xi + 40,333.$$

Значение достоверности аппроксимации для данной кривой: $R^2 = 0,9986$.



• Рис. 4. Чувствительность интерферометра для различных величин смещения
 • Fig. 4. Interferometer sensitivity for different displacement values

Заключение

Для анализа функционирования экспериментальной интерференционной установки конкретизирован вид используемого интерферометра сдвига и получено аналитическое выражение для разности фаз лучей, прошедших интерферометр. Простота конструкции и минимальная виброустойчивость интерферометра Жамена и определили его использование в данной установке.

При исследовании сигнала на выходе фотоприемника геометрия освещения изучаемого объекта и выбор направления наблюдения были произвольными.

В работе исследована чувствительность интерферометра для различных величин смещения точек поверхности объекта. Исследование представляет интерес для оптического приборостроения, в частности, современной голографии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гуров И. П., Ли Г. Интерферометрические методы и устройства контроля смещений негладких поверхностей. Методы и устройства с регистрацией неподвижных интерференционных картин // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84, № 1. С. 129–138.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
3. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
4. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 295 с.
5. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
6. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
7. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
8. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Kirillovsky V. K. Diffraction reference wavefront laser interferometer // Miniature and microoptics: fabrication and system applications. SPIE: The International society for optical engineering proceed. 1992. Vol. 5, № 1751. P. 197–200.
10. Takeda M., Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces // Applied optics. 1994. Vol. 33, № 34. P. 7829–7837.
11. Suzuki T., Sasaki O., Maruyama T. Real time displacement measurement in sinusoidal phase modulating interferometry // Applied optics. 1989. Vol. 28, № 24. P. 5270–5279.
12. Olsson A., Tang C. L. Dynamic interferometry techniques for optical path length measurement // Applied optics. 1981. Vol. 20, № 20. P. 3503–3507.
13. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей / М. В. Хохлова [и др.] // Международ. науч.-исслед. журн. 2021. № 6 (108). С. 184–189.
14. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов / Е. Е. Майоров [и др.] // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 33–37.
15. Оптическая голография. Т. 1 / под ред. Г. Колфилда; пер. с англ. под ред. С. Б. Гуревича. М.: Мир, 1982. 374 с.
16. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. М.: НИУ ИТМО, 2014. С. 195.

REFERENCES

1. Gurov I. P., Li G. Interferometric methods and devices for monitoring displacements of non-smooth surfaces. Methods and devices with registration of fixed interference patterns. Optics and spectroscopy. 1998;84(1):129–138. (In Russ.).

2. Born M., Wolf E. Fundamentals of optics. Moscow: Nauka; 1970. 855 p. (In Russ.).
3. Zakharyevsky A. N. Interferometers. Moscow: Oborongiz; 1952. 296 p. (In Russ.).
4. Kolomiytsev Yu. V. Interferometers. Leningrad: Mechanical engineering; 1976. 295 p. (In Russ.).
5. Afanasyev V. A. Optical measurements. Moscow: Nedra; 1968. 263 p. (In Russ.).
6. Malakara D. Optical production control; trans. from English. eds by A. N. Sosnova. Moscow: Mechanical engineering; 1985. 340 p. (In Russ.).
7. Kreopalova G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Optical measurements. Moscow: Mechanical engineering; 1987. 264 p. (In Russ.).
8. Akhmanov S. A., Dyakov Yu. E., Chirkin A. S. Introduction to statistical radiophysics and optics. Moscow; 1981. 640 p. (In Russ.).
9. Kirillovsky V. K. Diffraction reference wavefront laser interferometer. Miniature and microoptics: fabrication and system applications. SPIE: The International society for optical engineering proceed. 1992;5(1751):197–200.
10. Takeda M., Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces. Applied optics. 1994;33(34):7829–7837.
11. Suzuki T., Sasaki O., Marugama T. Real time displacement measurement in sinusoidal phase modulating interferometry. Applied optics. 1989;28(24):5270–5279.
12. Olsson A., Tang C. L. Dynamic interferometry techniques for optical path length measurement. Applied optics. 1981;20(20):3503–3507.
13. Khokhlova M. V., Dagaev A. V., Maiorov E. E., Arefyev A. V., Guliyev R. B., Gromov O. V. Interference system for measuring geometric parameters of reflective surfaces. International scientific research journal. 2021;(6(108)):184–189. (In Russ.).
14. Maiorov E. E., Prokopenko V. T., Mashek A. Ch., Tsygankova G. A., Kurlov A. V., Khokhlova M. V., Kirik D. I., Kapralov D. D. Experimental study of metrological characteristics of an automated interferometric system for measuring the surface shape of diffusely reflecting objects. Measuring technique. 2017;(10):33–37 (In Russ.).
15. Optical holography. Vol. 1; translated from English eds by S. B. Gurevich. Moscow: Mir; 1982. 374 p. (In Russ.).
16. Prokopenko V. T., Maiorov E. E. Interferometry of diffusely reflecting objects. Moscow: ITMO Research Institute; 2014, pp. 195. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Майоров Евгений Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – физическая оптика, оптическое приборостроение.

Поступила в редакцию 13.06.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Maiorov Evgeny E., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – physical optics, optical instrumentation.

Received 13.06.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 26.07.2024

Изучение влияния наличия аугментации данных на качество обучения модели сегментации YOLO8n

Сергей Геннадиевич Бабчинецкий¹

✉ lnpt@guap.ru, SPIN-код: 8867-0419

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследовано влияние аугментации данных на качество обучение модели YOLO (You Only Look Once) версии nano при обучении на наборе данных TACO для сегментации мусора. Результаты исследования говорят о том, что аугментация данных, несмотря на увеличение времени обучения пропорционально степени увлечения набора данных, смогла улучшить качество работы модели. Результаты исследования помогут выбрать наиболее подходящие параметры аугментации данных, что позволит повысить качество работы модели без необходимости перехода к более затратной модели. Это дает возможность сделать оперативное обнаружение мусора проще, что будет способствовать повышению безопасности и защите окружающей среды на строительных объектах.

Ключевые слова: сегментация, TACO, YOLO, аугментация данных

Для цитирования: Бабчинецкий С. Г. Изучение влияния наличия аугментации данных на качество обучения модели сегментации YOLO8n // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 61–67. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-61-67.

Original article

Studying the impact of data augmentation on the quality of training of the YOLO8n segmentation model

Sergey G. Babchinetsky¹

✉ lnpt@guap.ru, SPIN-code: 8867-0419

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article examined the influence data augmentation for quality training of the "YOLO" (You Only Look model Once) version of nano when trained on the "TACO" data set for segmentation garbage. The results of the study suggest that data augmentation, despite the increase in training time in proportion to the degree passion for the data set, was able to improve the quality. The research results will help you choose the most appropriate data augmentation parameters, which will improve quality of model performance without the need to switch to a more expensive one models. This will make prompt detection of garbage easier, which will help improve safety and environmental protection in construction sites.

Keywords: segmentation, TACO, YOLO, data augmentation

For citation: Babchinetsky S. G. Studying the impact of data augmentation on the quality of training of the YOLO8n segmentation model. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):61–67. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-61-67.

Введение

Для нахождения определенных объектов на большом количестве изображений разумно использовать специальные нейронные сети. Нейронные сети являются одним из типов машинного обучения. Как и в случае с другими алгоритмами машинного обучения, перед использованием их необходимо обучить под определенную задачу с помощью большого набора данных, чтобы алгоритм мог найти закономерности.

Набор данных должен быть очень большой и включать в себя все объекты, которые модель должна обрабатывать, во всех вариациях.

Поскольку если в наборе данных для обучения объект будет встречать только, например, в одном цвете, хотя в физическом мире он может существовать в различных цветах, модель может сделать неверное предположение, что при определении этого объекта нужно ориентироваться только на цвет, что делает невозможным получение верного результата при наличии этого объекта в другом цвете. По аналогичной причине объекты должны иметь разное положение и размер на изображении. Также нужно учитывать, что изображение, которое на вход получит модель, может быть искажено сжатием или некачественной техникой видеосъемки.

Для того, чтобы не дублировать каждый объект в разных условиях при создании набора данных, для чего потребуется дорогостоящая съемка, можно использовать такой прием, как аугментация данных. Этот прием заключается в том, чтобы применить перед обучением к оригинальным изображениям ряд случайных преобразований, получить их неполные копии и тем самым увеличить количество уникальных изображений. Например, можно применить случайный поворот в 50 % случаев, тогда половина изображений будет перевернута, и модели при обучении будет сложнее предположить, что класс объекта зависит от его положения на изображении.

Данную методику следует применять с осторожностью, обладая глубоким пониманием поставленной задачи и изначальных данных, поскольку неправильное использование преобразований изображений может привести к потере важных признаков. Например, если применять изменения в цветовой гамме изображений к объектам, различающимся исключительно цветом, это может сильно ухудшить возможность получения верного ответа как от модели, так и от человека. Также важно тщательно контролировать сочетания преобразований и степень их интенсивности, так как неправильное их сочетание или избыточные параметры могут нарушить необходимые для правильного определения объекта признаки.

Для того, чтобы оценить, как преобразования могут помочь улучшить качество обучения, необходимо использовать метрики. В задаче сегментации существует метрика mAP (средняя точность), основанная на значениях метрик recall (полнота) и precision (точность). Каждое изображение можно рассматривать как матрицу пикселей, отображающую цвет каждого пикселя. При сегментации модель создает маску, новую матрицу пикселей, отображающую принадлежность каждого пикселя к объекту, класс которого мы ищем. Относительно каждого пикселя модель может делать два типа предсказаний – позитивное (пиксель принадлежит искомому объекту) и негативное (пиксель не принадлежит искомому объекту), при этом предсказание может быть как верным, так и ложным.

Метрика recall (полнота) показывает, насколько хорошо модель предсказывает позитивные случаи. Precision (точность) определяет, насколько верны предсказания модели относительно позитивных случаев. Пусть ПИ – количество верных положительных предсказаний; НЛ, НИ, ПЛ определим таким же образом. Тогда recall (полнота) – это отношение всех верных позитивных предсказаний к сумме всех истинных позитив-

ных предсказаний и ложных негативных предсказаний:

$$\text{recall} = \text{ПИ} / (\text{ПИ} + \text{НЛ})^{-1},$$

$$\text{precision} = \text{ПИ} / (\text{ПИ} + \text{ПЛ})^{-1}.$$

Модели не могут давать дискретные значения, их результатом являются непрерывные. Для определения того, является ли предсказание позитивным или негативным, используется порог, выше которого предсказание считается позитивным, ниже – негативным. Для оценки качества работы модели без учета порога можно использовать ROC-кривую (Receiver Operating Characteristic, рабочая характеристика приемника), представляющую собой совокупность точек в двумерном пространстве, координатами которых являются значения метрик recall и precision при всех возможных значениях порога. Соединив все эти точки в кривую и подсчитав площадь под ней, мы получим метрику AP (Average Precision, средняя точность).

Модели сегментации часто не выделяют объект целиком, а создают непересекающиеся маски для него. Для объединения этих масок используется алгоритм «не максимального подавления», основанный на мере пересечения, выраженной в метрике IOU (Intersection Over Union). При расчете AP50 оценивается точность AP при IOU, равной 0,5. В случае нескольких классов эти метрики вычисляются отдельно для каждого класса, и затем берется их среднее значение.

$$\text{IOU} (A, B) = (A \cap B) / (A \cup B)^{-1}.$$

Материал и методы исследования

На платформе Roboflow был загружен набор данных TACO, состоящий из 1500 изображений и 60 классов. Размеры наборов данных для обучения (train), валидации (val) и тестирования (test) были распределены в соотношении 1050:300:150. Каждый набор данных прошел несколько этапов аугментации, а также изменение размеров изображений до 640×640 (что выполняется алгоритмом YOLO) и автоориентацию изображений. После этого каждый набор данных был загружен на компьютер для обучения модели YOLOv8n с параметром patience = 5 (обучение останавливалось после пяти эпох в случае отсутствия улучшения метрики) с целью проведения необходимого количества экспериментов за разумное время. Также использовался подход подбора максимального размера batch'a, который предотвращал переполнение памяти графического процессора.

При анализе данных и выборе параметров аугментации для генерации нового набора данных сделано предположение, что для каждого типа аугментации существует свой оптимум, причем чем больше отклонения, тем меньше будет качество работы у модели. Кроме того, подразумевается, что при использовании нескольких аугментаций они влияют на набор данных независимо друг от друга. Таким образом, если в одном наборе данных использовались аугментации *A* и *B*, а в другом – *A* и *C*, и при этом набор данных с аугментациями *AB* показал лучшее качество по сравнению с набором данных с аугментациями *AC*, можно сделать вывод, что аугментация *B* дает большее качество, чем аугментация *C*.

Используемые аугментации ограничивались только уровнем изображения из-за проблем с корректной работой аугментаций уровня масок. Кроме того, из-за большого количества параметров не было использовано *cutout*. Аугментации осуществлялись только на обучающей выборке данных. Затем проанализированы эффекты различных аугментаций на наборе данных с учетом максимального значения метрики *mAP50* в конце обучения и на эпохе, когда завершилось обучение хотя бы одной модели. Впоследствии будет создан дополненный набор данных для получения итоговой аугментации. Модель *YOLOv8n-seg* будет обучена на итоговом наборе данных без применения *patience*. Дополнительно, для сравнения, модели *YOLOv8n-seg*, *YOLOv8s-seg*, *YOLOv8s-seg* будут обучены на оригинальном наборе данных с целью продемонстрировать преимущества новой модели.

Результаты исследования

В табл. 1 приведены данные о влиянии одиночных аугментаций на метрику *mAP50*.

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что использование аугментации *Mosaic* приводит к значительному улучшению метрики как в конце обучения, так и на 12-й эпохе, когда уже закончилось свое обучение *Stop: 0 % Minimum Zoom, 1 % Maximum Zoom*. Аугментация *Mosaic* заключается в объединении четырех изображений подобно мозаике и последующем случайном обрезании центральной части до размеров одного изображения. Следует отметить, что *YOLO* по умолчанию применяет эту аугментацию, но только после 90-й эпохи (если не было достигнуто определенное качество), поэтому ее использование может потребовать дополнительной настройки.

Сделать выводы о других аугментациях сложно из-за того, что на некоторых из них

Roboflow генерировал меньшее количество изображений. Кроме того, некоторые аугментированные наборы данных имеют размер в 3 раза больше, чем у оригинального набора данных, что может повлиять на скорость обучения. Поэтому рационально рассмотреть остальные аугментации в сочетании с *Mosaic*, поскольку отказаться от нее невозможно из-за преимуществ в улучшении качества, и при этом выходной набор данных имеет фиксированное количество изображений.

Однако в рассмотрении не участвовали аугментации 9° (поворот на 9°), *Exposure* (экспозиция), *Hue* (оттенок), *Flip* (перевероты), *Grayscale* (преобразование в черно-белое) из-за слишком низких результатов по сравнению с другими аугментациями. Их невысокую эффективность можно объяснить увеличением размера набора данных.

Согласно данным табл. 2, к числу неэффективных аугментаций добавляется *Noise* (защумление изображений), так как она демонстрирует более низкое качество, чем только *Mosaic* на 12-й эпохе. Также *Brightness* (яркость), *Shear* (сдвиг) и *Rotation* (поворот) считаются неэффективными из-за того, что они приносят улучшение качества только при их минимальных значениях, а *Crop* (обрезка) не оправдывает себя из-за слишком низкого прироста качества.

Самым полезным набором аугментаций оказались *Saturation* – изменение насыщенности в пределах от -37 до $+37$ %, *Blur* – размытие до $1,5px$ и применение *Mosaic*. Дополнительная информация о производительности моделей и их качестве работы приведена в табл. 3.

Обсуждение

Аугментации производились с использованием библиотеки *Roboflow*, которая имеет очень ограниченное количество параметров для настройки, что может иметь большое значение. Например, при повороте изображения на 45° в углах изображения появляются большие черные треугольники, из-за чего эти области модели могут начать работать хуже, чем центральная, где изображение всегда присутствует. В других инструментах, таких как *Albumentation*, можно активировать отражение изображений, благодаря чему эти треугольники заполняются, и модель получает больше информации для обучения. Однако *Albumentation* не удалось использовать из-за отсутствия инструментов трансформации в формате набора данных, который поддерживает *Ultralytics*.

- Таблица 1. Влияние одиночных аугментаций на метрику mAP50
- Table 1. Study of single augmentations by mAP50 metric

Аугментация	Эпоха	Макс.	На 12 эпох
90B° Rotate: Clockwise, Counter-Clockwise, Upside Down	27	0,134	0,103
Blur: Up to 0.1px	40	0,128	0,091
Blur: Up to 0.8px	36	0,141	0,102
Brightness: Between -1 % and +1 %	19	0,121	0,120
Brightness: Between -25 % and +25 %	25	0,129	0,092
Brightness: Between -37 % and +37 %	19	0,122	0,110
Brightness: Between -50 % and +50 %	29	0,137	0,109
Brightness: Between -63 % and +63 %	23	0,121	0,104
Brightness: Between -75 % and +75 %	15	0,116	0,116
Crop: 0 % Minimum Zoom, 1 % Maximum Zoom	12	0,109	0,109
Crop: 0 % Minimum Zoom, 12 % Maximum Zoom	23	0,121	0,100
Crop: 0 % Minimum Zoom, 5 % Maximum Zoom	29	0,147	0,105
Crop: 0 % Minimum Zoom, 50 % Maximum Zoom	20	0,126	0,115
Crop: 0 % Minimum Zoom, 25 % Maximum Zoom	27	0,136	0,106
Crop: 0 % Minimum Zoom, 75 % Maximum Zoom	18	0,133	0,127
Exposure: Between -1 % and +1 %	24	0,146	0,114
Exposure: Between -15 % and +15 %	25	0,149	0,105
Exposure: Between -20 % and +20 %	21	0,128	0,107
Exposure: Between -25 % and +25 %	25	0,130	0,108
Exposure: Between -30 % and +30 %	25	0,144	0,116
Exposure: Between -40 % and +40 %	31	0,137	0,106
Exposure: Between -50 % and +50 %	21	0,125	0,110
Flip: Horizontal, Vertical	15	0,103	0,103
Grayscale: Apply to 1 % of images	22	0,095	0,063
Grayscale: Apply to 50 % of images	34	0,116	0,083
Hue: Between -145B° and +145B°	16	0,109	0,109
Hue: Between -180B° and +180B°	18	0,113	0,106
Hue: Between -1B° and +1B°	34	0,146	0,115
Hue: Between -45B° and +45B°	15	0,116	0,116
Hue: Between -90B° and +90B°	32	0,139	0,108
Mosaic: Applied	63	0,345	0,154
Noise: Up to 0.1 % of pixels	20	0,124	0,113
Noise: Up to 2 % of pixels	21	0,127	0,103
Rotation: 45B°	20	0,127	0,121
Rotation: Between -1B° and +1B°	24	0,127	0,103
Saturation: Between -1 % and +1 %	24	0,124	0,104
Saturation: Between -37 % and +37 %	24	0,144	0,106
Saturation: Between -50 % and +50 %	17	0,115	0,113
Saturation: Between -63 % and +63 %	17	0,126	0,126
Shear: B±10B° Horizontal, B±10B° Vertical	18	0,118	0,113
Shear: B±1B° Horizontal, B±1B° Vertical	24	0,138	0,115
Shear: B±20B° Horizontal, B±20B° Vertical	25	0,126	0,110
Shear: B±5B° Horizontal, B±5B° Vertical	19	0,120	0,112
Отсутствие	24	0,095	0,053

- Таблица 2. Влияние на метрику mAP50 некоторых аугментаций при использовании аугментации Mosaic
- Table 2. Impact on mAP50 metric of some augmentations when using Mosaic augmentation

Аугментация	Эпоха	Макс.	На 12 эпох
Mosaic: Applied	63	0,345	0,154
Blur: Up to 0.8px Mosaic: Applied	43	0,272	0,135
Blur: Up to 1.5px Mosaic: Applied	34	0,252	0,159
Blur: Up to 2px Mosaic: Applied	30	0,246	0,145
Brightness: Between -1 % and +1 % Mosaic: Applied	13	0,170	0,170
Brightness: Between -45 % and +45 % Mosaic: Applied	50	0,250	0,146
Brightness: Between -50 % and +50 % Mosaic: Applied	30	0,216	0,138
Crop: 0 % Minimum Zoom, 2 % Maximum Zoom Mosaic: Applied	22	0,219	0,159
Crop: 0 % Minimum Zoom, 5 % Maximum Zoom Mosaic: Applied	47	0,306	0,165
Noise: Up to 0.5 % of pixels Mosaic: Applied	57	0,331	0,144
Rotation: Between -1B° and +1B° Mosaic: Applied	18	0,260	0,260
Rotation: Between -22B° and +22B° Mosaic: Applied	33	0,210	0,135
Rotation: Between -22B° and +22B° Mosaic: Applied	100	0,285	0,135
Rotation: Between -45B° and +45B° Mosaic: Applied	54	0,295	0,126
Saturation: Between -1 % and +1 % Mosaic: Applied	35	0,271	0,144
Saturation: Between -15 % and +15 % Mosaic: Applied	30	0,245	0,160
Saturation: Between -37 % and +37 % Mosaic: Applied	39	0,314	0,194
Shear: B±1B° Horizontal, B±1B° Vertical Mosaic: Applied	37	0,306	0,175

- Таблица 3. Оценка производительности моделей YOLOv8-seg
- Table 3. Performance evaluation of YOLOv8-seg models

Размер модели	Размер файла, МБ	mAP50	Полное время обработки 100 кадров, с
Без модели	–	–	3,978
nano	6,4	0,142	213,157
small	22,7	0,192	395,056
medium	52,3	0,227	827,685
nano (аугментированная)	6,4	0,39	213,157

Также сначала были сделаны предположения о характере зависимостей уровня улучшения качества от значений параметров аугментации. Для получения более точной информации и проверки этих гипотез необходимо провести еще более масштабный поиск параметров и совместимости аугментаций. Однако это потребовало бы в несколько раз больше ресурсов времени.

Из-за низкого уровня терпимости (patience) все модели обучались очень мало и даже не приблизились к своему максимальному качеству, из-за чего все эти результаты относительно и неточны. Итоговая модель не успела достичь максимального качества за 100 эпох (ограничение по умолчанию), ее метрики могут быть выше.

Заключение

В ходе исследования было обнаружено значительное улучшение качества работы модели при наличии аугментации в наборе данных для обучения. Результаты модели, которая обучалась на аугментированных данных, оказались даже выше, чем у модели с большим числом параметров, которая обучалась на оригинальном наборе данных. Использование более компактной модели без потери качества позволит значительно экономить вычислительные ресурсы во время работы и упростит интеграцию модели в различные системы. Однако для выбора необходимых аугментаций потребуется большее количество времени и ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Github репозиторий набора данных. URL: <https://github.com/pedropro/TACO> (дата обращения: 10.06.2024).
2. Загруженный на kaggle необработанный набор данных. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/denisg04/taco-dataset> (дата обращения: 10.06.2024).
3. Загруженный на kaggle обработанный набор данных. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/denisg04/taco-yolo-format> (дата обращения: 10.06.2024).
4. Блокнот с результатами обучения для моделей размера nano и smal. URL: <https://www.kaggle.com/code/denisg04/notebook5d581452d6> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Блокнот с результатами обучения для моделей размера medium. URL: <https://www.kaggle.com/code/denisg04/notebook87167bf36c> (дата обращения: 10.06.2024).
6. Библиотека для обработки изображений. URL: <https://opencv.org/> (дата обращения: 10.06.2024).
7. Исходный код библиотеки Ultralytics. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата обращения: 10.06.2024).
8. Документация библиотеки Ultralytics. URL: <https://docs.ultralytics.com/> (дата обращения: 10.06.2024).
9. Proença P. F., Simões P. Аннотации мусора в контексте обнаружения мусора. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06975> (дата обращения: 10.06.2024).
10. Boundary IoU: улучшение оценки объектно-ориентированной сегментации изображений / D. Cheng [et al.]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.16562> (дата обращения: 10.06.2024).
11. Terven J., Cordova-Esparza D. Всесторонний обзор YOLO: от YOLOv1 и далее. URL: <https://doi.org/10.3390/ma5040083> (дата обращения: 10.06.2024).
12. Обучите YOLOv8 на пользовательском наборе данных. URL: <https://habr.com/ru/articles/714232/> (дата обращения: 10.06.2024).
13. Ultralytics YOLOv8. URL: <https://habr.com/ru/articles/710016/> (дата обращения: 10.06.2024).
14. Метрика mAP. URL: <https://ml.i-neti.ru/map-mean-average-precision/> (дата обращения: 10.06.2024).
15. Опасность строительного мусора. URL: <https://berkana.spb.ru/articles/opasnost-stroitelno-go-musora/> (дата обращения: 10.06.2024).
16. Опасность мусора на стройке. URL: <https://uvozim-musor.ru/opasen-li-stroitelnyj-musor/> (дата обращения: 10.06.2024).
17. Ресурс, использованный для обучения моделей. URL: <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 10.06.2024).
18. Количество параметров и качество работы моделей. URL: [https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco?dimension=Params%20\(M\)](https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco?dimension=Params%20(M)) (дата обращения: 10.06.2024).
19. Модель Yolo 3. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1421305/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 10.06.2024).
20. Алгоритм не максимального подавления. URL: <https://learnopencv.com/non-maximum-suppression-theory-and-implementation-in-pytorch> (дата обращения: 10.06.2024).

REFERENCES

1. Github dataset repository. Available from: <https://github.com/pedropro/TACO> [Accessed 10 June 2024].
2. Raw dataset uploaded to kaggle. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/denisg04/taco-dataset> [Accessed 10 June 2024].
3. Processed dataset uploaded to kaggle. Available from: <https://www.kaggle.com/datasets/denisg04/taco-yolo-format> [Accessed 10 June 2024].
4. Notebook with training results for nano and smal size models. Available from: <https://www.kaggle.com/code/denisg04/notebook5d581452d6> [Accessed 10 June 2024].
5. Notebook with training results for medium size models. Available from: <https://www.kaggle.com/code/denisg04/notebook87167bf36c> [Accessed 10 June 2024].
6. Library for image processing. Available from: <https://opencv.org/> [Accessed 10 June 2024].
7. Ultralytics library source code. Available from: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> [Accessed 10 June 2024].
8. Ultralytics library documentation. Available from: <https://docs.ultralytics.com/> [Accessed 10 June 2024].
9. Proença P. F., Simões P. Garbage annotations in the context of garbage detection. Available from: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.06975> [Accessed 10 June 2024].
10. Cheng B., Girshick R., Dollár P., Berg A. C., Kirillov A. Boundary IoU: Improving the evaluation of object-based image segmentation. Available from: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.16562> [Accessed 10 June 2024].

11. Terven J., Cordova-Esparza D. A comprehensive review of YOLO: from YOLOv1 onwards. Available from: <https://doi.org/10.3390/make5040083> [Accessed 10 June 2024].
12. Train YOLOv8 on a custom dataset. Available from: <https://habr.com/ru/articles/714232/> [Accessed 10 June 2024].
13. Ultralytics YOLOv8. Available from: <https://habr.com/ru/articles/710016/> [Accessed 10 June 2024].
14. mAP metric. Available from: <https://ml.i-neti.ru/map-mean-average-precision/> [Accessed 10 June 2024].
15. Danger of construction waste. Available from: <https://berkana.spb.ru/articles/opasnost-stroitel'nogo-musora/> [Accessed 10 June 2024].
16. The danger of debris at a construction site. Available from: <https://uvozim-musor.ru/opasen-li-stroitel'nyj-musor/> [Accessed 10 June 2024].
17. The resource used to train the models. Available from: <https://www.kaggle.com/> [Accessed 10 June 2024].
18. Number of parameters and quality of model performance. Available from: [https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco?dimension=Params%20\(M\)](https://paperswithcode.com/sota/object-detection-on-coco?dimension=Params%20(M)) [Accessed 10 June 2024].
19. Model Yolo 3. Available from: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1421305/FULLTEXT01.pdf> [Accessed 10 June 2024].
20. The algorithm is not maximum suppression. Available from: <https://learnopencv.com/non-maximum-suppression-theory-and-implementation-in-pytorch> [Accessed 10 June 2024].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Бабчинецкий Сергей Геннадиевич, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – математическое моделирование, машинное обучение.

Поступила в редакцию 16.04.2024

Поступила после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Babchinetsky Sergey G., Postgraduate Student at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – include mathematical modeling, machine learning.

Received 16.04.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 26.07.2024

Модульный подход к разработке объектно-ориентированных систем для анализа временных рядов

Мария Владимировна Галимова¹

✉ kivy123@mail.ru

Кирилл Вячеславович Золотухин¹

zoloto.kv@mail.ru, orcid.org/0009-0001-5164-3204, SPIN-код: 8043-6670

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен модульный подход к созданию комплекса с использованием объектно-ориентированной технологии, а именно – объектно-классовая структура и принципы ее построения. Спроектирована классовая структура системы обработки и анализа многомерных временных рядов с использованием модульного подхода. За счет объектно-ориентированной и модульной архитектур обеспечены гибкость и масштабируемость системы, что позволяет легко добавлять новые алгоритмы и методы анализа. Построена UML-диаграмма классов для облегчения реализации системы с использованием языка программирования.

Ключевые слова: объектно-ориентированный подход, модульный подход, система, анализ временных рядов, сигнал, абстракция, класс

Для цитирования: Галимова М. В., Золотухин К. В. Модульный подход к разработке объектно-ориентированных систем для анализа временных рядов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 68–73. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-68-73.

Original article

Modular approach to the development of object-oriented systems for time series analysis

Maria V. Galimova¹

✉ kivy123@mail.ru

Kirill V. Zolotukhin¹

zoloto.kv@mail.ru, orcid.org/0009-0001-5164-3204, SPIN-code: 8043-6670

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article considers the modular approach to the creation of a complex using object-oriented technology, namely the object-class structure and the principles of its construction. The class structure of the system of processing and analyzing multivariate time series using the modular approach is designed. Due to the object-oriented and modular architecture flexibility and scalability of the system are provided, which allows to easily add new algorithms and methods of analysis. The UML class diagram is built to facilitate the implementation of the system using a programming language.

Keywords: object-oriented approach, modular approach, system, time series analysis, signal, abstraction, class

For citation: Galimova M. V., Zolotukhin K. V. Modular approach to the development of object-oriented systems for time series analysis. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):68–73. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-68-73.

Введение

Анализ временных рядов является одной из важнейших задач в различных областях науки и техники, включая геофизику, экономику и медицину. Временные ряды, такие как данные о погоде, экономические показатели или физиологические сигналы, требуют тщательной обработки и анализа для точной интерпретации и прогнозирования. Разработка гибкой и масштабируемой системы для анализа временных

рядов требует применения современных методологий программирования и проектирования, таких как объектно-ориентированный и модульный подходы.

Модульный подход к разработке программного обеспечения дает возможность независимой разработки, тестирования и развертывания отдельных компонентов системы. Это особенно важно для систем анализа временных рядов, где часто требуется адаптация к новым типам данных и алгоритмам обработки. Объектно-

ориентированный подход, в свою очередь, позволяет структурировать систему в виде объектов, что упрощает понимание и управление сложностью программного обеспечения.

Объектно-ориентированный и модульный подходы

В данной статье рассматривается модульный подход к созданию комплекса с использованием объектно-ориентированной технологии, а именно – объектно-классовая структура комплекса – и принципы ее построения. Рассмотрим основные компоненты программы, исключая описание реализации пользовательского интерфейса.

Основные этапы разработки объектно-ориентированного приложения [1]:

1) анализ предметной области (object-oriented analysis, OOA) – детальное исследование предметной области с целью выявления основных сущностей и их взаимосвязей и выделение ключевых абстракций;

2) проектирование системы (object-oriented design, OOD) – проектирование системы на основе выделенных абстракций, разработка архитектуры системы, определение классов и их иерархии, а также отношений между ними;

3) реализация и программирование (object-oriented programming, OOP) – реализация системы с использованием объектно-ориентированных принципов, обеспечение интеграции всех компонентов системы.

Модульный подход дополняет объектно-ориентированный, позволяя создавать независимые и взаимозаменяемые компоненты, что значительно упрощает разработку, тестирование и сопровождение системы.

Информационная модель сигнала. Пусть в результате непосредственных измерений параметров работы приборов был получен «сырой» временной ряд. Обработка таких данных некорректна, так как данные приборных измерений часто сопровождаются сбоями оборудования, перерывами в наблюдениях и шумами различной природы. Поэтому их необходимо преобработать, очистив сигнал от шумов и выбросов.

Методы предварительной обработки включают в себя:

- 1) проверку наличия тренда во временном ряде;
- 2) выявление аномальных наблюдений;
- 3) сглаживание временных рядов.

Модель включает несколько этапов обработки данных [2]:

этап s0: исходный сигнал;

этап s1: «очищенный» сигнал после преобработки;

этап s2: разделенный на сегменты сигнал;

этап S3: модель, состоящая из классифицированных сегментов;

этап S4: прогнозирование дальнейшего поведения временного ряда.

Модульный подход в системе

В рамках модульного подхода каждый алгоритм и метод реализуется как независимый модуль. Это позволяет легко заменять и добавлять новые модули без необходимости переписывать существующий код. Например, для добавления нового алгоритма сегментации достаточно создать новый модуль, который реализует интерфейс сегментации, и интегрировать его в систему (рис. 1).

Примеры модулей:

– модуль преобработки: включает в себя различные методы фильтрации и очистки данных;

– модуль сегментации: реализует алгоритмы разбиения сигнала на сегменты;

– модуль классификации: содержит методы классификации сегментов сигнала;

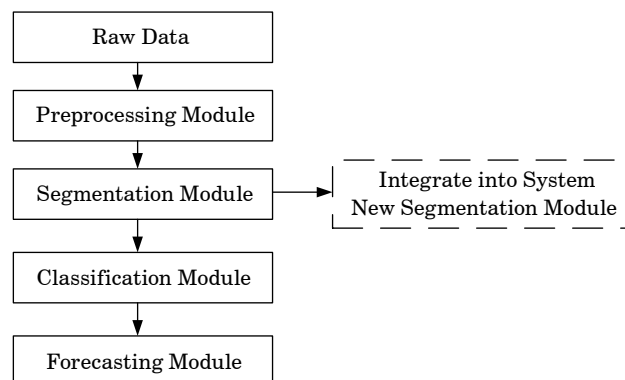
– модуль визуализации: обеспечивает отображение данных и результатов анализа.

Каждый алгоритм и метод реализуется как независимый модуль, что позволяет легко заменять и добавлять новые модули без необходимости переписывать существующий код:

– Raw Data поступает в систему;

– Preprocessing Module очищает сигнал от шумов и выбросов;

– Segmentation Module делит данные на сегменты;



• Рис. 1. Графическое представление модульного подхода к анализу временных рядов

• Fig. 1. Graphical representation of the modular approach to time series analysis

– Classification Module классифицирует сегменты;

– Forecasting Module предсказывает поведение временного ряда.

Для добавления нового алгоритма сегментации достаточно создать новый модуль (например, New Segmentation Module), реализовать интерфейс сегментации и интегрировать его в систему.

При проектировании системы важно выделить ключевые абстракции, чтобы определить основные компоненты и их взаимодействие. Это позволяет структурировать систему и обеспечивает ее гибкость и масштабируемость. Например, выделение абстракций, таких как «Raw Data», «Preprocessing», «Segmentation», «Classification» и «Forecasting» позволяет четко определить границы и ответственность каждого модуля. Благодаря этому можно легко обновлять и расширять функциональность системы, добавляя новые алгоритмы или улучшая существующие модули, без нарушения целостности всей системы [3].

Таким образом, выделение ключевых абстракций и их реализация в виде независимых модулей формируют основу для гибкой и масштабиру-

емой архитектуры системы анализа временных рядов.

Выделены следующие ключевые абстракции:

– модульная область (Module_Space): основное пространство, в котором размещаются и взаимодействуют все модули системы;

– модуль (Module): основная абстракция для всех компонентов системы, включая алгоритмы и методы обработки данных;

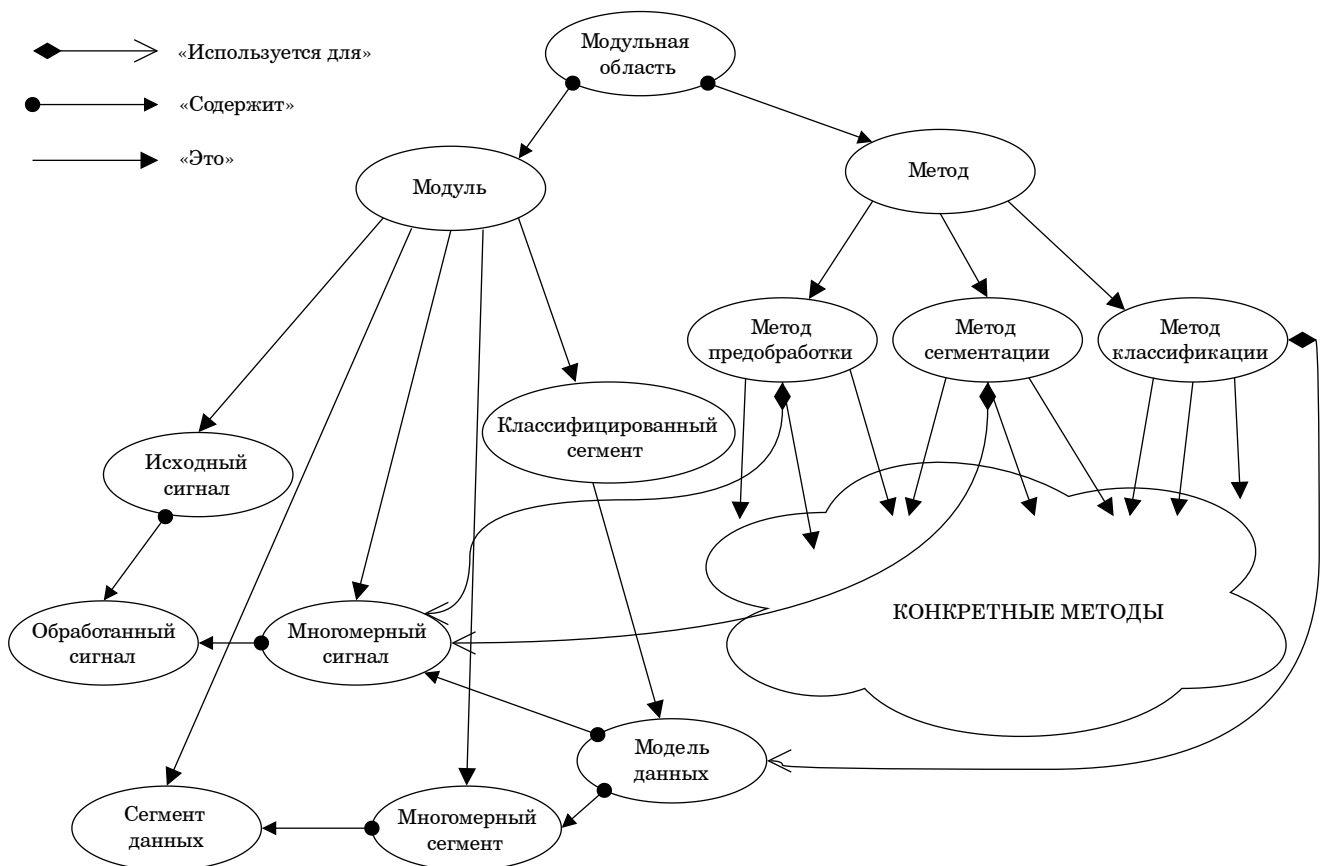
– исходный сигнал (Raw_Signal): начальные данные в виде временного ряда, представляющие собой набор значений, привязанных к моментам времени;

– обработанный сигнал (Processed_Signal): сигнал, очищенный от шумов и выбросов, готовый к дальнейшему анализу;

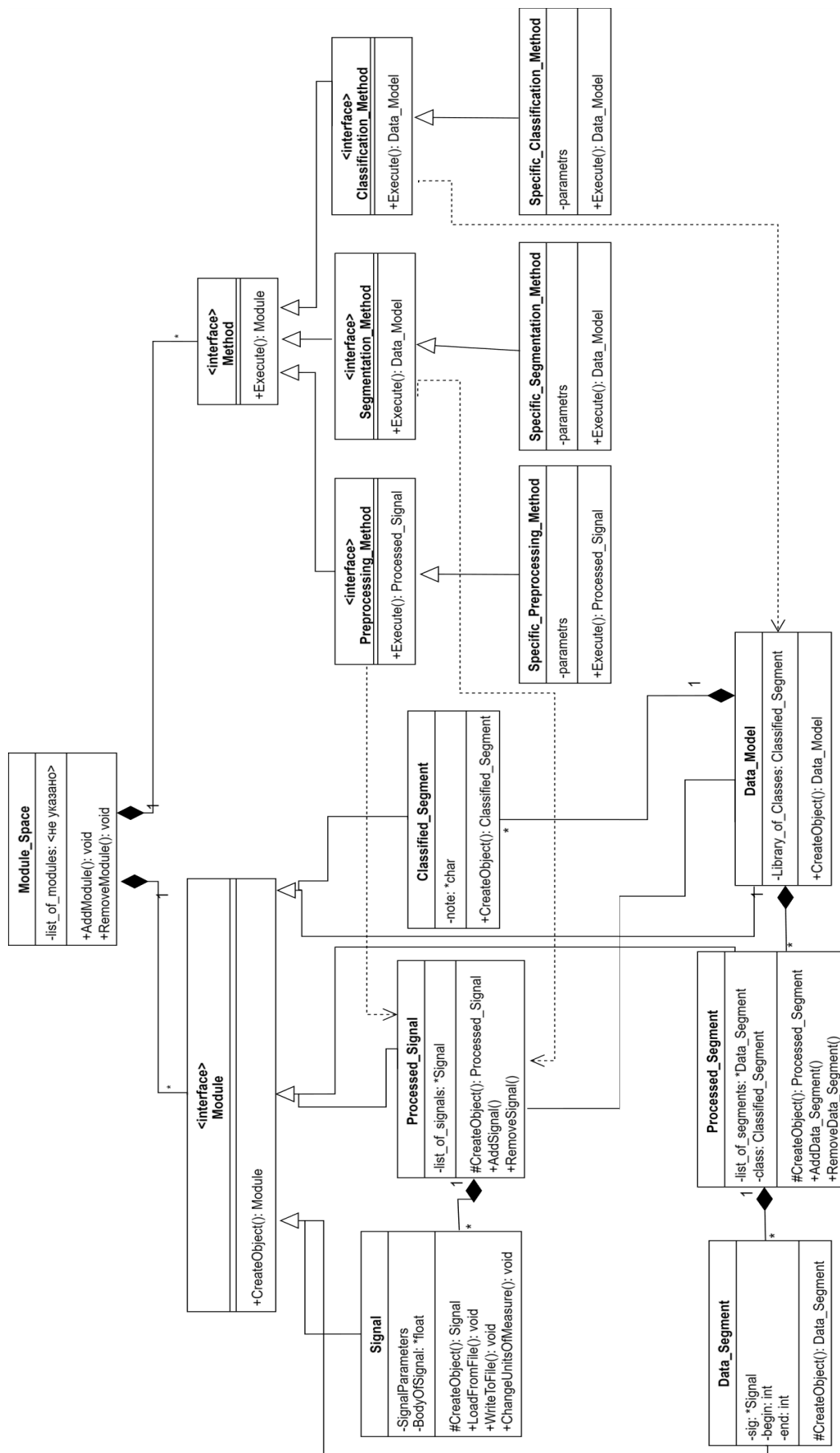
– сегмент данных (Data_Segment): часть сигнала, выделенная для более детального анализа или обработки;

– классифицированный сегмент (Classified_Segment): сегмент, который прошел процесс классификации;

– модель данных (Data_Model): структура, описывающая сигналы, их компоненты и правила обработки;



• Рис. 2. Связи между абстракциями
 • Fig. 2. Relationships between abstractions



• *Рис. 3. UML-диаграмма классов*
 • *Fig. 3. UML class diagram*

– метод (Method): определяет процедуры обработки и анализа данных, такие как предобработка, сегментация и классификация;

– методы предобработки, сегментации, классификации (Preprocessing_Method, Segmentation_Method, Classification_Method): конкретные реализации алгоритмов для очистки данных, их разделения на сегменты и классификации соответственно.

Эти абстракции обеспечивают четкие границы и ответственность для каждого компонента, упрощая их разработку, тестирование и интеграцию.

В приборостроении часто требуется анализировать несколько взаимосвязанных временных рядов, таких как температура, давление и вибрация. Для более точного анализа и учета взаимосвязей между параметрами были введены многомерные сигналы. Многомерные сегменты позволяют локализовать и детализировать аномальные события в данных, улучшая классификацию и прогнозирование. Это дает возможность получать более полную картину состояния системы и точнее интерпретировать результаты анализа. Чтобы учитывать возможность обработки многомерных сигналов, добавлены две новые абстракции:

1) многомерный сигнал (Multidimensional_Signal) – сложный сигнал, состоящий из нескольких измерений или компонентов, требующих совместного анализа;

2) многомерный сегмент (Multidimensional_Segment) – сегмент, выделенный из многомерного сигнала, для анализа отдельных его компонентов или их взаимодействий.

Все абстракции, которые приведены выше, изображены на рис. 2 с определенными между ними отношениями.

Эти абстракции реализуются соответствующими классами, которые связаны определенными отношениями в UML [4].

В контексте разработки системы обработки временных рядов ключевым элементом является абстракция «сигнал», представляющая собой последовательность значений, изменяющихся во времени. В рамках объектно-ориентированного подхода для представления этой абстракции была выделена иерархия классов [5], основанная на принципе «общее/частное», где более общий класс служит основой для более специализированных классов.

В данной системе была выделена иерархия, в которой класс Signal служит базовым классом для двух типов сигналов – «исходный сигнал» и «обработанный сигнал». Класс Signal определяет

основные свойства и методы, применимые к любому типу сигнала, такие как получение значения в определенный момент времени, вычисление длительности и т. д.

Классы «исходный сигнал» и «обработанный сигнал» наследуют свойства и методы класса Signal и дополняют их специфическими характеристиками. «Исходный сигнал» описывает сырые данные, полученные из источника, в то время как «обработанный сигнал» представляет результат применения некоторых алгоритмов обработки к исходному сигналу [6].

Использование иерархии классов «общее/частное» позволяет обеспечить эффективное и структурированное представление данных и алгоритмов обработки сигналов. Это упрощает разработку и поддержку системы, позволяя добавлять новые типы сигналов и методов обработки без изменения базового класса Signal.

Следующая структура отражена на UML-диаграмме классов (рис. 3).

UML-диаграмма состоит из:

1) Module_Space – содержит набор модулей (Module) и методы обработки (Method);

2) Module – может содержать различные типы данных (Signal, Processed_Signal, Data_Segment, Classified_Segment, Data_Model);

3) Method – является абстрактным классом, от которого наследуют Preprocessing_Method, Segmentation_Method и Classification_Method;

4) Processed_Signal – представляет собой множество сигналов, а Multidimensional_Segment – множество сегментов;

5) Data_Model – описывает Processed_Signal с помощью Processed_Segment и классом Classified_Segment.

Выводы

1. Разработанная система обработки временных рядов демонстрирует высокую гибкость, модульность и расширяемость, обеспечивая эффективное решение задач анализа данных.

2. Система обладает способностью адаптироваться к различным требованиям за счет использования разнообразных методов обработки данных. Такая гибкость достигается благодаря модульной архитектуре.

3. Принцип наследования и композиции обеспечивает легкую расширяемость системы новыми функциями. Новые модули и классы могут быть легко интегрированы в существующую структуру без значительных изменений кода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон, А. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. М.: Вильямс, 2010. 736 с.
2. Луковенкова О. О., Тристанов А. Б. Разработка объектно-ориентированной архитектуры системы обработки и анализа временных рядов // Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук: Материалы ежегод. межрегион. науч.-практ. конф. (г. Петропавловск-Камчатский, 11 февр. 2011 г.): в 3 ч. Ч. 3. Петропавловск-Камчатский: Камчат. гос. ун-т им. Витуса Беринга, 2012. С. 104–108.
3. Зырянов А. Ю. Модульный подход к построению систем управления требованиями // Науч.-техн. вестн. С.-Петербур. гос. ун-та информ. технологий, механики и оптики. 2008. № 46. С. 163–168.
4. Леоненков А. Самоучитель UML. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 432 с.
5. Олейник П. П. Иерархия классов метамодели объектной системы // Объектные системы. 2012. № 6. С. 37–40.
6. Базеева Н. А., Петянкин М. Ф., Соболев Д. С. Развитие объектно-ориентированного программирования // E-Scio. 2019. № 6 (33). С. 119–125.

REFERENCES

1. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. Object-oriented analysis and design with applications. Moscow: Williams; 2010. (In Russ.).
2. Lukovenkova O. O., Tristanov A. B. Razrabotka ob'ektno-orientirovannoj arkhitektury sistemy obrabotki i analiza vremennykh ryadov = Development of an object-oriented architecture for a system for processing and analyzing time series. Teoriya i praktika sovremennykh gumanitarnykh i estestvennykh nauk: Materialy ezhegodnoj mezhhregional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii (Petropavlovsk-Kamchatsky, 11 February 2011). Petropavlovsk-Kamchatsky: Vitus Bering Kamchatka State University; 2012, pp. 104–108. (In Russ.).
3. Zyryanov A. Y. Modul'nyj podkhod k postroeniyu sistem upravleniya trebovaniyami = Modular approach to the construction of requirements management systems. Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2008;(46):163–168. (In Russ.).
4. Leonenkov A. Samouchitel' UML = UML Tutorial. SPb.: BHV-Petersburg; 2004. (In Russ.).
5. Olejnik P. P. Ierarkhiya klassov metamodeli ob'ektnoj sistemy = Hierarchy of classes in the metamodel of an object system. Ob'ektnye sistemy. 2012;(6):37–40. (In Russ.).
6. Bazeeva N. A., Petyankin M. F., Sobolev D. S. Razvitie ob'ektno-orientirovannogo programmirovaniya = Development of object-oriented programming. E-Scio. 2019;6(33):119–125. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Галимова Мария Владимировна, студентка кафедры системного анализа и логистики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – системный анализ, оптимизация аналитических моделей для решения комплексных задач, улучшение процессов принятия решений и прогнозирования.

Золотухин Кирилл Вячеславович, аспирант, ассистент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизация производственных систем, реинжиниринг технологических процессов, управление изменениями производственных систем.

Поступила в редакцию 04.06.2024

Поступила после рецензирования 11.06.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Galimova Maria V., Student at the Department of System Analysis and Logistics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – system analysis, optimisation of analytical models for solving complex problems, improvement of decision-making and forecasting processes.

Zolotukhin Kirill V., Postgraduate Student, Assistant at the Department of Metrological Support of Innovative Technologies and Industrial Safety, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automation of production systems, process re-engineering, change management of production systems.

Received 04.06.2024

Revised 11.06.2024

Accepted 26.07.2024

Архитектура высокопроизводительного NAND Flash-контроллера с распределенной программно-аппаратной подсистемой коррекции ошибок

Владимир Викторович Хрусталеv¹

✉ v_crys@mail.ru, SPIN-код: 2916-0850

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Производительность, надежность и энергоэффективность современных твердотельных накопителей в значительной степени определяются возможностями контроллеров, установленных в них. Выбранная архитектура контроллера и алгоритмы, которые в нем реализованы, определяют характеристики и стоимость конечного устройства. Одним из наиболее нагруженных узлов контроллера является подсистема помехоустойчивого кодирования. В данной работе предлагается распределенная архитектура помехоустойчивых блоков на примере кода Боуза – Чоудхури – Хоквингема и архитектура контроллера SSD-накопителя, основанная на них. Особенностью данной архитектуры является глубокая интеграция вычислительных ядер в процесс декодирования, что делает этот процесс программно-аппаратным и существенно увеличивает гибкость и возможности помехоустойчивой системы NAND Flash-контроллера. Представлены преимущества предлагаемой архитектуры по сравнению с используемыми на данный момент архитектурами NAND-контроллеров.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке профессора кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения Натальи Александровны Шехуновой.

Ключевые слова: NAND, SSD controller, Flash, ASIC, BCH, контроллер памяти, помехоустойчивые коды

Для цитирования: Хрусталеv В. В. Архитектура высокопроизводительного NAND Flash-контроллера с распределенной программно-аппаратной подсистемой коррекции ошибок // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 74–81. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-74-81.

Original article

Architecture of a high-performance NAND Flash controller with a distributed software and hardware error correction subsystem

Vladimir V. Khrustalev¹

✉ v_crys@mail.ru, SPIN-code: 2916-0850

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The performance, reliability and energy efficiency of modern solid-state drives are determined by the capabilities of the controllers installed in them. Depending on the selected controller architecture and the algorithms implemented on this architecture, the characteristics and cost of the final device are determined. One of the most loaded controller nodes is the ECC subsystem. This paper provides an overview of currently used NAND controller architectures. A distributed architecture of Error Correction blocks is proposed using the BCH codec as an example, and an SSD drive controller architecture based on them is proposed. A feature of this architecture is the deep integration of computing cores into the decoding process, which makes this process hardware-software and significantly increases the flexibility and capabilities of the Error Correction NAND Flash controller system.

Acknowledgements. The work was supported by the professor at the Department of Aerospace Computer and Software Systems at the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Natalia A. Shekhunova.

Keywords: NAND, SSD controller, Flash, ASIC, BCH, memory controller, noise-resistant codes

For citation: Khrustalev V. V. Architecture of a high-performance NAND Flash controller with a distributed software and hardware error correction subsystem. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2024;3(4):74–81. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2024-4-74-81.

Введение

В современном мире Flash-память является наиболее популярным способом хранения информации. Вследствие бурного развития полупровод-

никовых технологий идея хранения информации на плавающем затворе транзистора (который является базовой ячейкой Flash-памяти) получила свою популярность и вытеснила другие способы хранения информации, например, на магнитных носите-

лях. Ежегодное уменьшение техпроцесса и удешевление производства полупроводников постепенно позволили Flash-памяти занять лидирующие позиции среди других средств хранения информации.

Основными архитектурами организации ячеек Flash-памяти являются NAND и NOR. У каждой из них есть свои положительные и отрицательные стороны. Для хранения больших объемов информации используют NAND-архитектуру Flash-памяти. Особенностью данной архитектуры является то, что перезапись информации в ее ячейки разделена на два этапа – стирание и запись. Причем минимальный размер стираемой памяти достаточно велик. Эта особенность усугубляется тем, что ресурс количества стираний ограничен и уменьшается с ростом плотности ячеек. Износ Flash-памяти связан с тем, что при стирании подается высокое напряжение на ячейки памяти, что приводит к изнашиванию плавающего затвора транзистора [1].

Большой минимальный размер перезаписываемой части памяти и небольшой ее ресурс накладывают существенные ограничения на использование этого типа памяти. Для борьбы с этими нежелательными особенностями существуют специальные подходы и алгоритмы, которые реализуются на специальных контроллерах NAND Flash-памяти. Вопросу построения оптимальной архитектуры таких контроллеров и, в частности, системы коррекции ошибок в них посвящена данная статья.

Виды NAND Flash-контроллеров и их архитектура

Микросхемы NAND Flash используются в различных электронных устройствах, которые

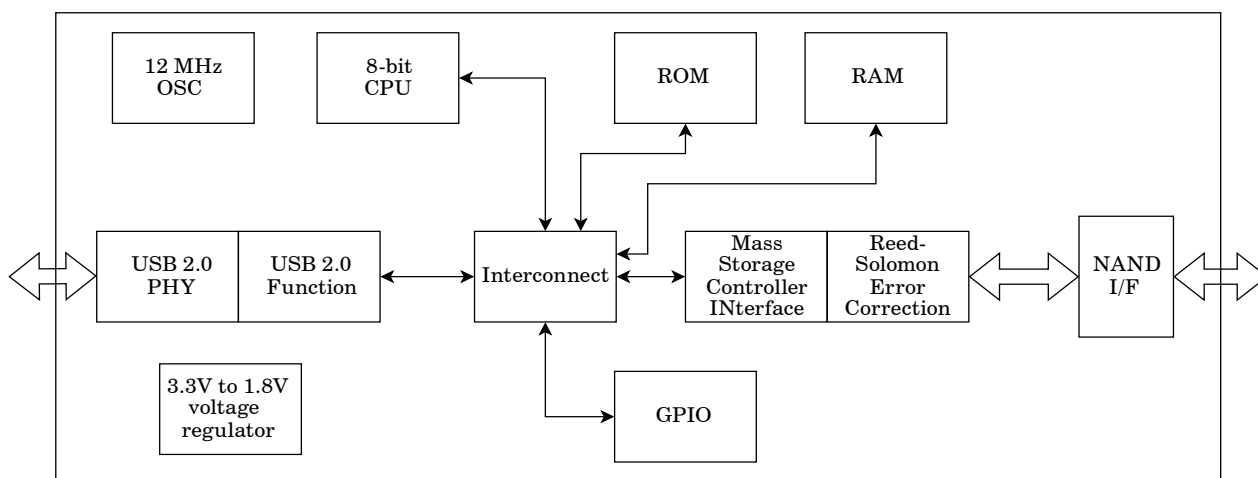
имеют разнообразные сферы применения. Каждое конкретное применение имеет свои особенности и формирует свои требования к системе хранения информации. К таким особенностям применения и требованиям можно отнести скорость работы, надежность (с точки зрения количества циклов перезаписи), надежность (с точки зрения предельного срока службы), потребление энергии, частоту использования, внешние негативно влияющие факторы и т. д.

Наиболее популярными являются следующие сферы применения NAND Flash:

- USB Flash-накопители;
- микросхемы памяти в носимых гаджетах (MMC/eMMC);
- SSD-диски.

Исторически первыми массовыми применениями NAND Flash-памяти стали USB-Flash-накопители. Они отличались невысокой стоимостью и имели небольшую скорость работы. Один из примеров контроллера USB Flash [2] приведен на рис. 1.

Как видно на рис. 1, USB-Flash-контроллер состоит из 8-битного микроконтроллера, блока исправления ошибок и его интерфейса (кодек Рида – Соломона), блока взаимодействия с NAND Flash-памятью и блоков интерфейса пользователя (USB 2.0). При чтении-записи данные последовательно, друг за другом, проходят блок взаимодействия с микросхемой памяти, кодер-декодер, блок интерфейса пользователя. Микроконтроллер используется для управления этими блоками и контролирует состояние микросхемы памяти. Микропрограммное обеспечение данного контроллера поддерживает механизм трансляции логических и физических адресов для выравнивания износа и управления плохими блоками [3].



- Рис. 1. Архитектура USB 2.0 Flash-контроллера (ST72681)
- Fig. 1. Architecture of USB 2.0 Flash controller (ST72681)

У данного решения есть два основных недостатка. Во-первых, низкая скорость работы, вызванная приостановкой тракта данных в случае необходимости декодирования ошибок помехоустойчивым блоком. Во-вторых, отсутствие возможности записать обратно в микросхему памяти прочитанные из нее данные, что требуется для механизма «сборка мусора» и других профилактических механизмов, увеличивающих срок службы накопителя.

К достоинствам можно отнести простоту реализации и низкую стоимость конечного продукта.

Для удобного применения Flash в носимых гаджетах, где существуют требования к габаритам устройства, Flash-память и ее контроллер объединяют в единый чип. В зависимости от возможности извлечения накопителя подразделяют на MMC и eMMC. Архитектура контроллера в этих случаях близка к архитектуре контроллеров для USB Flash.

Долгое время применение Flash-памяти ограничивалось носимыми гаджетами и USB-Flash-накопителями. Причинами низкой популярности емких Flash-накопителей, SSD-дисков, были высокая стоимость бита Flash-памяти и их низкая надежность по сравнению с другими средствами хранения информации [4]. Для уменьшения цены бита информации Flash-памяти, а также увеличения ее емкости было предложено в одной ячейке Flash-памяти хранить несколько бит информации, так как логическое значение ячейки зависит от наличия определенного количества заряда на плавающем затворе транзистора, есть возможность квантовать это значение не на два уровня (одноуровневая Flash, SLC), а на четыре (двухуровневая, MLC), восемь и т. д., что, соответственно, позволяет хранить большее количество информации. Однако это существенно снижает надежность (ресурс одноуровневой и двухуровневой памяти отличается в 10 раз) и уменьшает скорость работы Flash-памяти. Таким образом, для построения надежных, емких и высокоскоростных накопителей на основе этой памяти потребовалось разработать высокотехнологичные и многофункциональные контроллеры для этих дисков.

Типичная архитектура SSD контроллера показана на рис. 2. Данное изображение взято из презентации, представленной на конференции «Flash Memory Summit» [5]. Похожие решения предлагаются и в работах [6–8]. Для управления SSD-накопителем внутри контроллера присутствуют вычислительные ядра. Программное обеспечение, выполняющееся на них, реализует логику трансляции логических и физических адресов (для выравнивания износа и игнорирования плохих блоков), сбора мусора (для увеличения долговечности

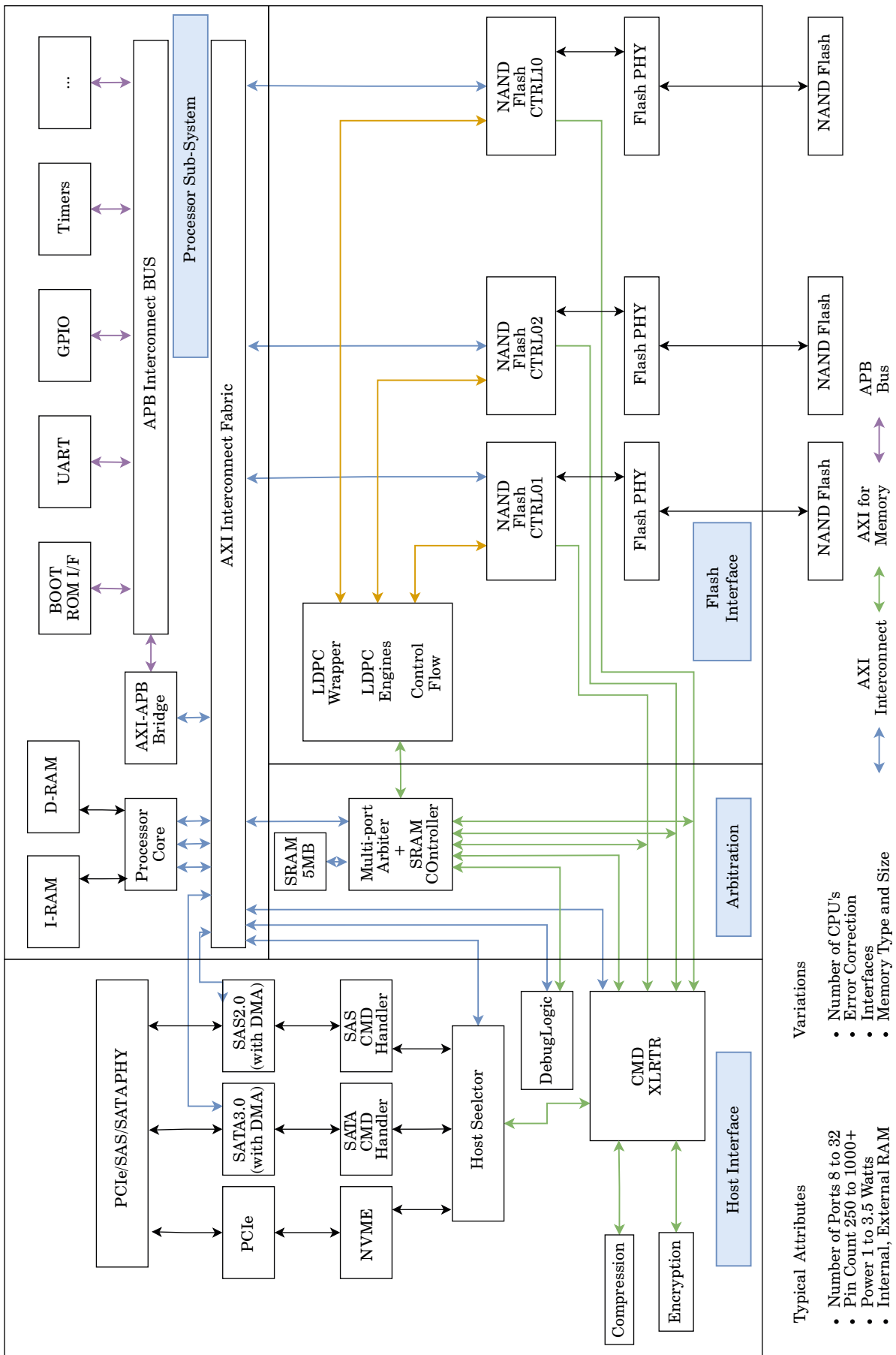
и производительности контроллера), управление блоками помехоустойчивого кодирования, сжатия, шифрования данных, контроль доступа к информации, сбор статистики работы накопителя и др. Количество ядер и их производительность зависят от общей архитектуры системы, количества аппаратных ускорителей и сложности задач, возлагаемых на них. Например, существуют решения для SSD-контроллеров, когда используются высокопроизводительные DSP-ядра для реализации практически всех алгоритмов, необходимых для работы SSD [9]. Существенное преимущество такого подхода заключается в возможности изменять любые алгоритмы работы SSD-контроллера уже после его производства и даже продажи конечному пользователю путем обновления прошивки.

Кроме процессорной подсистемы, на рис. 2 показано несколько (от 8 до 32) независимых каналов для подключения микросхем Flash-памяти, каждый из которых контролируется независимым аппаратным блоком, выполняющим базовые операции с памятью (стирание, запись, чтение). Эти блоки по независимым интерфейсам подключены к общей памяти, блоку помехоустойчивого кодирования (в данном примере – LDPC-кодеку) и процессорным ядрам. На уровне интерфейса пользователя представлены аппаратные блоки, реализующие логику физических интерфейсов пользователя, а также ускорители для шифрования и сжатия данных. Основная идея и преимущество такой архитектуры заключаются в распараллеливании большинства процессов, происходящих при обработке данных, что и позволяет достичь высокой пропускной способности системы. Программное управление всеми потоками позволяет существенно снизить сложность реализации и отладки контроллера.

На приведенной на рис. 2 типовой схеме указан общий подход к архитектуре, однако существует множество особенностей ее реализации, которые могут ключевым образом повлиять на производительность системы. Эти особенности являются интеллектуальной собственностью производителей SSD-контроллеров и не публикуются. В частности, одним из важнейших блоков, который определяет эффективность контроллера, является блок, реализующий подсистему коррекции ошибок в хранимой информации.

Альтернативная разделенная архитектура помехоустойчивых блоков

В классической реализации подсистемы коррекции ошибок отдельно реализуются кодер и декодер. Причем декодер, как правило, имеет вну-

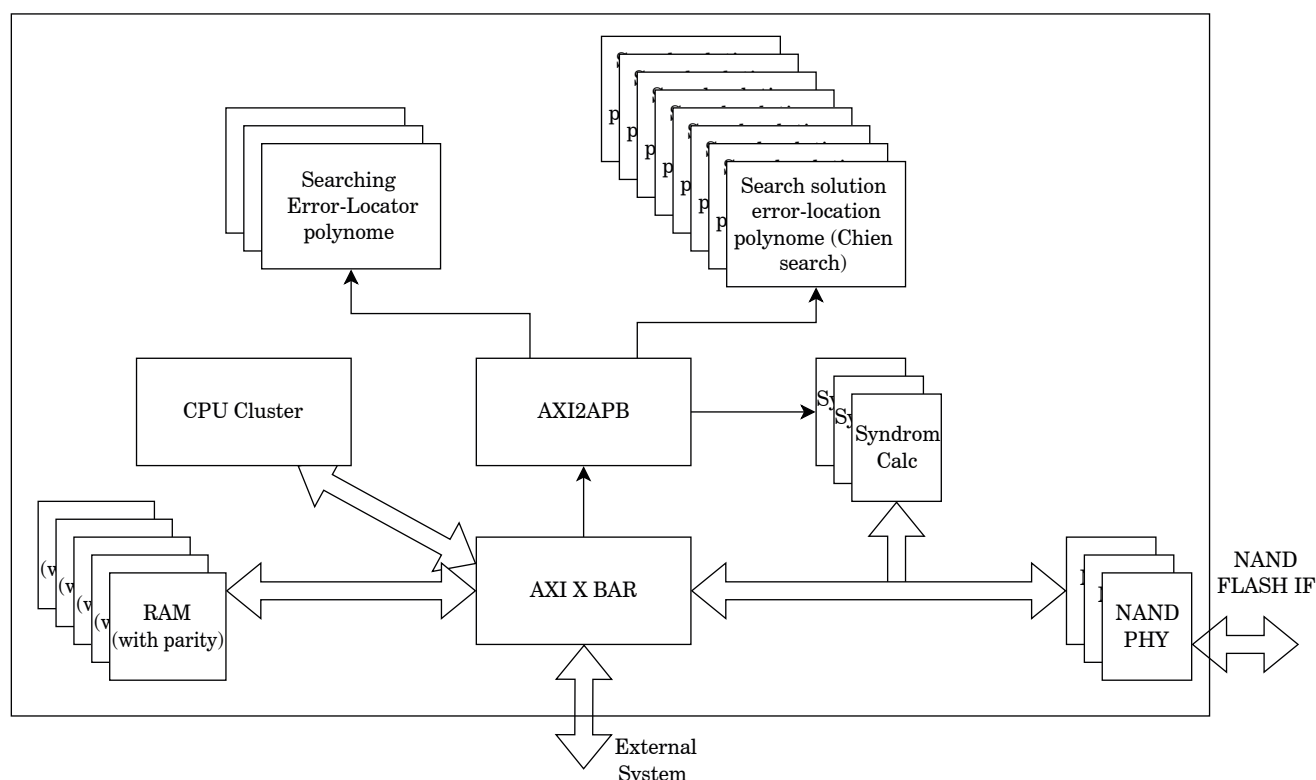


• Рис. 2. Типовая архитектура SSD-контроллера
 • Fig. 2. Typical SSD controller architecture

твенную машину состояний, реализован в виде конвейера (поочередно выполняются этапы декодирования) и принимает на свой вход слово из канала, а на выход формирует кодовое слово [10]. Такая архитектура логична и понятна для разработчика помехоустойчивых кодов. Однако она имеет существенный недостаток, который заключается в отсутствии возможности повторно использовать разные части декодера, реализующие различные этапы декодирования. Из теории помехоустойчивого кодирования известно, что различные этапы алгоритмов декодирования кодов имеют разную сложность реализации [11]. Это приводит к тому, что различные части декодера, реализующие эти этапы, работают разное количество времени, и это время зависит от количества ошибок, которые требуется исправить. Будут возникать ситуации простаивания одних частей декодера, в то время как другие части декодера будут продолжать работать.

Для борьбы с этим недостатком предлагается разбить декодер на несколько независимых частей. Например, в случае использования для коррекции ошибок кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (БЧХ-декодера) необходимо отделить друг от друга блок вычисления синдрома, блок поиска ключевого уравнения, блок решения ключевого уравнения и блок исправления

ошибок. Блок вычисления синдрома, так как эта часть фактически является БЧХ-кодером, предлагается подключить параллельно к шинам данных между блоками памяти и аппаратными блоками NAND-интерфейса. Это позволит без лишних затрат времени вычислять синдром для декодирования при записи считанных данных в RAM и вычислять проверочные символы для кодирования при записи данных в аппаратный блок NAND-контроллера. После вычисления синдрома процессор сохраняет его в RAM рядом с соответствующими ему данными. Блок вычисления ключевого уравнения принимает на вход синдром, а на выходе формирует коэффициенты ключевого уравнения. Причем синдром на вход блока устанавливает процессор из RAM, в которую ранее были записаны считанные из Flash-данные. Сохранение коэффициентов ключевого уравнения в RAM также выполняется процессором. Блок решения ключевого уравнения методом Чена на вход принимает коэффициенты ключевого уравнения, а также диапазон, в котором осуществляется поиск решения. Эти установки также выполняет процессор. Решения ключевого уравнения вычитываются процессором для дальнейшей корректировки. Заметим, что наличие у блока решения ключевого уравнения возможности настройки диапазона, в котором происходит



• Рис. 3. Архитектура аппаратно-программного кодера-декодера БЧХ
 • Fig. 3. Architecture of hardware-software encoder-decoder BCH

поиск решения, позволяет легко распределить решение одного уравнения между несколькими такими блоками. Архитектура предлагаемого декодера показана на рис. 3.

При проектировании такой распределенной системы важно определить необходимое количество каждой из частей декодера. В предлагаемом декодере установлено столько блоков вычисления синдрома, сколько отдельных микросхем памяти. Это связано с тем, что данная операция выполняется параллельно с загрузкой данных и имеет минимальную задержку. Количество отдельно стоящих RAM должно быть больше, чем количество блоков вычисления ключевого уравнения. Это связано с тем, что далеко не в каждой странице будут ошибки и за счет дополнительных блоков памяти есть возможность продолжать чтение памяти, даже если в ранее загруженных страницах были ошибки и ведется работа по их исправлению. Количество блоков решения ключевого уравнения Ченя должно быть не меньше количества блоков вычисления ключевого уравнения (в случае относительно невысокой степени распараллеливания этой процедуры в блоке). Чем больше блоков решения ключевого уравнения Ченя будет и чем проще они будут, тем более гибким получится декодер.

Следует сказать, что показанная на рис. 3 схема может быть легко дополнена аппаратными блоками шифрования, скремблирования, сжатия информации и любых других блоков обработки информации, а также аппаратной частью интерфейса пользователя при помощи подключения соответствующих блоков к центральному AXI X BAR. Это позволит получить полноценный NAND Flash-контроллер из данной архитектуры.

В последнее время авторы ряда работ, в частности, [11], рекомендуют в качестве декодеров подсистем коррекции ошибок использовать LDPC-декодеры. Свою популярность они получили благодаря возможности распараллеливания алгоритма декодирования. Важным преимуществом LDPC-кодов перед BCH-кодами является существование простых алгоритмов мягкого декодирования этих кодов, которое позволяет достичь меньших значений вероятности ошибочного декодирования. Однако реализация алгоритмов мягкого декодирования LDPC-кодов, в которых одна и та же страница Flash-памяти читается несколько раз и на основе результатов считывания формируется информация о надежности каждого бита, требует дополнительного энергопотребления и дополнительной памяти, увеличивающей площадь кристалла, что для ряда областей применения памяти, например, для бортовых накопителей летательных аппа-

ратов с длинным сроком функционирования, оказывается неприемлемым. Поэтому работы в области построения и исследования оптимальных архитектур декодеров на основе BCH-кодов остаются актуальными. Например, в 2019 г. опубликована интересная работа [12] с описанием архитектуры высокопроизводительного NAND Flash-контроллера, где в качестве помехоустойчивого кода используются BCH-коды. Несмотря на то, что в работе предлагается классический вариант BCH-декодера, когда все его части подключены последовательно, авторам удалось добиться неплохой пропускной способности (на тестах). Ввиду того, что размер кодового слова, как правило, составляет размер страницы, объемом которой обычно составляет 4 КБ, а скорость работы накопителя достигает нескольких ГБ в секунду, вместо явного распараллеливания алгоритма декодирования можно воспользоваться структурной избыточностью. То есть возможно упростить декодер, незначительно потеряв на его производительности и сэкономив на его площади, и поставить несколько экземпляров таких декодеров. Причем в случае эффективной архитектуры большое количество относительно медленных декодеров позволяет добиться высокой пропускной способности и сэкономить энергию, когда отсутствует необходимость в высокой производительности системы.

Следует заметить, что представленный декодер фактически является набором из нескольких декодеров. В классическом случае разработчики устанавливают сразу несколько одинаковых декодеров. Причем зачастую эти декодеры имеют внутреннюю память, так как должны хранить принятое слово для декодирования, прежде чем выдать его наружу. Однако в этом случае один простаивающий декодер никак не может ускорить работу другого. При этом декодеры занимают существенную площадь на кристалле, так как каждый из них содержит память и большую часть логики, которая никак не задействуется, когда декодер не работает. Предложенная схема лишена этих недостатков. Интегрирование процессорных ядер для управления процессом декодирования и гибкого программного распределения задач между частями аппаратных декодеров позволяет проводить проверку считанных данных и кодирование (вне зависимости от загрузки остальных частей кода), одновременно исправлять ошибки в нескольких страницах, управлять скоростью декодирования в зависимости от приоритетов, в случае освобождения ресурсов после одного декодирования тут же перераспределять освободившиеся ресурсы на другие декодирования и т. д. Кроме этого, появляется возможность

доработки и дальнейшего улучшения этих алгоритмов путем обновления программного обеспечения контроллера.

Заключение

В работе были рассмотрены основные подходы к проектированию контроллеров для NAND Flash-памяти. Как было сказано, существенная часть алгоритмов выполняется на процессорных ядрах, встроенных в NAND-контроллеры. Существуют решения, при которых доминирующая часть обработки данных, часто практически вся, реализуется на высокопроизводительных DSP-кластерах. Такой программный подход к проектированию NAND-контроллеров позволяет упростить их разработку и отладку, а также оставляет возможность дальнейшего совершенствования их. Однако как бы ни была привлека-

тельна эта идея, алгоритмы помехоустойчивого кодирования в подавляющем большинстве случаев требуют аппаратной реализации из-за их высокой сложности и жестких требований к пропускной способности. Причем реализуются БЧХ-декодеры в классическом последовательном виде, без возможности программного управления процессом декодирования. Предлагаемая в работе распределенная схема БЧХ-кодека, где управление всем процессом декодирования производится процессорным ядром при помощи набора специализированных ускорителей, позволяет избавиться от недостатков классического жестко-аппаратного и полностью программного подходов. Также в работе представлена идея использования большого количества относительно простых декодеров (или их частей), объединенных архитектурой с большим количеством отдельных блоков памяти, вместо малого количества классических декодеров, требующих большой площади кристалла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Michelsoni R., Crippa L., Marelli A.* Inside NAND Flash memories. Springer Dordrecht. 2010. Doi: 10.1007/978-90-481-9431-5.
2. ST Microelectronics: документация на микросхему ST72681. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/st72681.html> (дата обращения: 01.02.2024).
3. *Stievano I.* Flash memories. Rijeka: IntechOpen, 2011. Doi: 10.5772/775.
4. *Ковалев С. И., Хрусталева В. В.* Применение кодов с малой корректирующей способностью для повышения надежности флеш-памяти // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Часть I. СПб.: ГУАП, 2017. С. 109–114.
5. *McIntyre D.* Annual flash controller update // Flash Memory Summit. 2018. P. 17.
6. *Yixin L.* Architectural techniques for improving NAND Flash memory reliability. School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, 2018.
7. Memory controller architectures: A comparative study / K. Khalifa [et al.] // IEEE. 2013.
8. SSD technologies: SSD architecture. URL: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/ssd-technologies-ssd-architecture/thread/667232672784728064-667213859733254144> (дата обращения: 01.02.2024).
9. Processor solutions for SSDs and Flash controllers. URL: <https://www.synopsys.com/designware-ip/processor-solutions/processor-markets/storage/ssd-flash-controller.html> (дата обращения: 01.02.2024).
10. *Ковалев С. И., Хрусталева В. В.* Исправление двух ошибок кодом Боуза – Чоудху и Хоквингема, построенным на основе лексикографически упорядоченной проверочной матрицы // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. I. СПб., 2018. С. 97–100.
11. *Blahut R. E.* Theory and practice of error control codes. Addison-Wesley Pub. Co., 1983.
12. Design and implementation of ECC module based on BCH code in SSD / Y. Niu [et al.] // International journal of circuits, systems and signal processing. 2019. P. 448–493.

REFERENCES

1. *Michelsoni R., Crippa L., Marelli A.* Inside NAND Flash memories. Springer Dordrecht; 2010. Doi: 10.1007/978-90-481-9431-5.
2. ST Microelectronics: Technical documentation on chip ST72681. Available from: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/st72681.html> [Accessed 01 February 2024].
3. *Stievano I.* Flash memories. Rijeka: IntechOpen; 2011. Doi: 10.5772/775.
4. *Kovalev S. I., Khrustaleva V. V.* The usage of the small correcting ability codes for increasing of the flash memory reliability. Scientific session of the GUAP: collection of reports: in 3 p. P. I. SPb.: SUAI; 2017, pp. 109–114. (In Russ.).

5. McIntyre D. Annual flash controller update. Flash Memory Summit. 2018, pp. 17.
6. Yixin L. Architectural techniques for improving NAND Flash memory reliability. School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, 2018.
7. Khalifa K., Fawzy H., El-Ashry S., Salah K. Memory controller architectures: A comparative study. IEEE. 2013.
8. SSD technologies: SSD architecture. Available from: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/ssd-technologies-ssd-architecture/thread/667232672784728064-667213859733254144> [Accessed 01 February 2024].
9. Processor solutions for SSDs and Flash controllers. Available from: <https://www.synopsys.com/designware-ip/processor-solutions/processor-markets/storage/ssd-flash-controller.html> [Accessed 01 February 2024].
10. Kovalev S. I., Khrustalev V. V. Double error correction by the bch code based on lexicographic parity check matrix. Scientific session of the GUAP: collection of reports: in 3 p. P. I. SPb.: SUAI; 2018, pp. 97–100. (In Russ.).
11. *Blahut R. E.* Theory and practice of error control codes. Addison-Wesley Pub. Co.; 1983.
12. Niu Y., Liu S., Chen Ya., Wang X., Liu H. Design and implementation of ECC module based on BCH code in SSD. International journal of circuits, systems and signal processing. 2019, pp. 448–493.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Хрусталеv Владимир Викторович, аспирант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование, архитектуры современных вычислительных устройств.

Khrustalev Vladimir V., Postgraduate Student at the Department of Aerospace Computer and Software Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – error correction codes, designs of modern computing devices.

Поступила в редакцию 02.05.2024

Поступила после рецензирования 13.05.2024

Принята к публикации 26.07.2024

Received 02.05.2024

Revised 13.05.2024

Accepted 26.07.2024

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

**Бобрышов А. П., Солёный С. В.,
Кузьменко В. П.** Анализ и оценка ключевых
конструктивных особенностей, опреде-
ляющих качество электрических контрольно-
измерительных приборов..... 5

**Загидуллин Р. С., Ткаченко А. А., Михеев М. А.,
Крюкова А. К.** Разработка концепции
универсальной платформы беспилотного
летательного аппарата на основе
применения метода QFD 14

Крупина Н. Н. Инновации в вендинге:
направления технического совершенство-
вания 22

Милова В. М., Гаврилова А. Д. Подход к опти-
мизации процесса управления персоналом
посредством внедрения цифровых
технологий 28

**Чабаненко А. В., Рассыхаева М. Д.,
Комарова В. С.** Проектирование производ-
ственных процессов изготовления
научоемкой продукции 34

Золотухин К. В. Типы стандартизированной
работы в системе бережливого произ-
водства в производственных системах
«Тойоты» и «Росатома» 40

Милова В. М., Вагенлейтер К. А. иденти-
фикация несоответствий в процессе
входного контроля с помощью технологии
компьютерного зрения..... 45

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Майоров Е. Е. Рефрактометрический
контроль оптически мутных жидкофазных
сред экспериментальной установкой..... 51

Майоров Е. Е. Исследование эксперимен-
тальной интерференционной установки
на базе интерферометра Жамена
для измерения смещения точек
поверхности 56

CONTENTS

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. PRODUCTION ORGANIZATION

Bobryshov A. P., Solony S. V., Kuzmenko V. P.
Analysis and evaluation of key design
features that determine the quality
of electrical test and measurement
instruments 5

**Zagidullin R. S., Tkachenko A. A.,
Mikheyev M. A., Kryukova A. K.** Development
of the concept of a universal unmanned
aerial vehicle platform based on the appli-
cation of the QFD method 14

Krupina N. N. Innovations in vending:
directions for technical improvement 22

Milova V. M., Gavrilova A. D. An approach
to optimizing the personnel management
process through the introduction of digital
technologies 28

**Chabanenko A. V., Rassyhaeva M. D.,
Komarova V. S.** Design of production
processes for the manufacture of high-tech
products 34

Zolotukhin K. V. Types of standardized work
in lean production systems: Toyota
production system and Rosatom production
system 40

Milova V. M., Vagenleiter K. A. Identification
of nonconformities in the process of incoming
inspection with the help of computer vision
technology 45

METHODS AND DEVICES OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

Maiorov E. E. Refractometric control of
optically cloudy liquid-phase media
by an experimental setup 51

Maiorov E. E. Investigation of an experimental
interference installation based on the Jamin
interferometer for measuring the displace-
ment of surface points 56

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ
И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Бабчинецкий С. Г. Изучение влияния наличия
аугментации данных на качество обучения
модели сегментации YOLO8n..... 61

Галимова М. В., Золотухин К. В. Модульный
подход к разработке объектно-ориентиро-
ванных систем для анализа временных
рядов 68

СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Хрусталеv В. В. Архитектура высокопроиз-
водительного NAND Flash-контроллера
с распределенной программно-
аппаратной подсистемой коррекции
ошибок 74

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL
AND INFORMATION PROCESSING

Babchinetsky S. G. Studying the impact
of data augmentation on the quality
of training of the YOLO8n segmentation
model 61

Galimova M. V., Zolotukhin K. V. Modular
approach to the development of object-
oriented systems for time series analysis..... 68

TELECOMMUNICATION SYSTEMS,
NETWORKS AND DEVICES

Khrustalev V. V. Architecture of a high-
performance NAND Flash controller
with a distributed software and hardware
error correction subsystem..... 74

Требования к порядку представления рукописей для публикации в научном журнале «Инновационное приборостроение»

1. Для публикации в журнале принимаются оригинальные научные материалы, не публиковавшиеся ранее и соответствующие тематической направленности журнала и критериям научного качества, представляющие интерес для научного сообщества. Авторы представляют в редакцию бумажную и электронную версии статьи в формате Microsoft Word (файл «Структура статьи и образец ее оформления» находится на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/obr.pdf>). Заключение пишется в повествовательном стиле, не разбивается на пункты. Выводы должны быть лаконичными и точными, состоять из нескольких пронумерованных пунктов. Обычно количество пунктов соответствует количеству поставленных задач.

2. Объем статьи не должен быть менее 12 000 знаков с пробелами (7–8 машинописных страниц) и не должен превышать 40 000 знаков с пробелами (22–23 машинописные страницы).

Распечатка статьи должна быть подписана всеми авторами с указанием даты ее отправки.

3. К рукописи статьи должны прилагаться две рецензии (внутренняя и внешняя), заключения экспертной комиссии и комиссии экспортного контроля, отчет о проверке на наличие заимствований (процент оригинальности статьи должен составлять не менее 80).

4. При оформлении статьи необходимо придерживаться следующей структуры информации, представленной **на русском и английском языках**:

– фамилия, имя и отчество автора(-ов) полностью; ученая степень, ученое звание, почетное звание (если имеются); должность, название учреждения(-ий), в котором выполнена работа; город, где находится учреждение(-ия), страна. Если рукопись подается от нескольких учреждений, их следует пронумеровать надстрочко и так же пронумеровать авторов статьи. Необходимо указать телефоны, адреса электронной почты, ORCID авторов (при наличии); одного из авторов следует указать в качестве ответственного за переписку;

– индекс УДК. Помещают в начале статьи на отдельной строке слева;

– заглавие статьи;

– аннотация / Abstract. Объем ограничен 250 словами, использование ссылок и аббревиатур не допускается;

– ключевые слова / Keywords. У статьи может быть от 3 до 15 ключевых слов. Термины-словосочетания считаются одним ключевым словом.

5. В конце статьи размещается список источников / References на русском и английском языках. Список источников и ссылки на них оформляют по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографические записи в перечне нумеруют и располагают в порядке цитирования источников в тексте статьи. References оформляют согласно стилю Vancouver (файл «Основные правила оформления References в стиле Vancouver» расположен на сайте: <https://fs.guap.ru/inps/vancouver.pdf>).

Краткие технические требования к оформлению статьи

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и список источников) не должен превышать 22–23 страниц машинописного текста формата А4, набранных на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 14, поля не менее 2 см.

Простые **формулы** следует набирать в Word, сложные – с помощью редактора MathType или Equation. В десятичных дробях ставятся запятые. Для набора одной формулы не используйте два редактора одновременно. При наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой. Номер формулы (если он есть) набирается в тексте справа от формулы в скобках, не в формульном редакторе, не в таблице. Нумеруются те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. При нумерации формул рекомендуется пользоваться десятичной системой.

При наборе формулы используйте только настройки по умолчанию; никогда не пользуйтесь вкладкой Size, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, введенные в текст; пробелы в формуле ставьте только после запятой при перечислении с помощью Ctrl+Shift+Space (пробел); не отделяйте пробелами знаки: + = - ×, а также пространство внутри скобок; для выделения греческих символов в MathType полужирным начертанием используйте Style → Other → bold.

Для набора формул в Word никогда не используйте вкладки: «Уравнение», «Конструктор», «Формула» (на верхней панели: «Вставка» – «Уравнение»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что латинские набираются светлым курсивом, русские и греческие – светлым прямым, векторы и матрицы – прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации:

– рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, они должны быть выполнены в векторных программах: Visio (*.vsd, *.vsdx); Adobe Illustrator (*.ai); Coreldraw (*.cdr, версия не выше 15); Excel (*.xls); Word (*.docx); AutoCad, Matlab (экспорт в PDF, EPS, SVG, WMF, EMF); Компас (экспорт в PDF), веб-портал DRAW.IO (экспорт в PDF); Inkscape (экспорт в PDF);

– фотографии и скриншоты – в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Графические материалы (рисунки, схемы, иллюстрации) должны иметь последовательные порядковые номера, подписанные подписи на русском и английском языках (Рис. 1 / Fig. 1), обязательные ссылки в тексте. Условные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном тексте статьи или подрисовочной подписи.

Таблицы должны иметь последовательные порядковые номера, названия на русском и английском языках (Таблица 1 / Table 1), ссылки в тексте. Для всех показателей в таблице необходимо указать единицы измерений по СИ, ГОСТ 8.417-2002.

Полный перечень технических требований расположен на сайте: https://fs.guap.ru/inps/tech_tr.pdf.

**Рукописи, не соответствующие указанным требованиям,
не рассматриваются**

**Автор несет полную ответственность за точность и достоверность данных, приведенных в рукописи статьи,
присылаемой в редакцию журнала**