

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(32)
2025

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И
ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2025

Главный редактор
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Заместитель главного
редактора

Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия

Вартанов М.В., д.т.н., проф.
(г. Москва)

Греков Н.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Жмудь В.А., д.т.н., доц.,
(г. Новосибирск)

Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Моисеев Д.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Осипов К.Н., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Песчанский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Петрешин Д.И., д.т.н., проф.
(г. Брянск)

Прейс В.В., д.т.н., проф.
(г. Тула)

Щенятский А.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Заморёнов М.В., к.т.н., доц
(г. Севастополь)

Майстришин М.М., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Рапакский Ю.Л., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Камцев В.А., Филипович О.В.** Идентификация распределений случайных составляющих погрешностей измерения с применением искусственных нейронных сетей 4
- Грушун А.И., Грушун Т.А., Осадченко А.Е., Карапетян В.А.** Оценка быстродействия системы автоматического управления промышленного робота 22
- Толоконский А.О., Менюк Д.С.** Сравнительный анализ традиционных методов параметрической оптимизации автоматических регуляторов АЭС и метода с применением аналитических тренажеров 31
- Шлаев В.И., Бильчук М.В.** Обобщенная модель автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения 43
- Тугашова Л.Г., Тагиров А.Ф.** Автоматизация и управление установкой по получению микробного белка на основе многоконтурных систем 54
- Жмудь В.А., Асет А., Ахметова А.М., Абдилдаева А.А.** Оптимизация с помощью искусственного интеллекта давления воды в диспетчеризации водоснабжения 65

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Щетинин Е.Ю., Пестрякова А.В.** Разработка модели пространственно-временного трансформера и его применение для автоматизированной диагностики патологий сердечного ритма 74
- Осипов К.Н.** Модель предиктивного прогнозирования параметров сварных соединений 87
- Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И.** Функции распределения случайных величин и их функционалы 95
- Бохонский А.И., Варминская Н.И., Майстришин М.М.** Эквивалентное по энергоемкости релейное ускорение реверсионно конструируемому 102

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Зуев С.М., Дебелов В.В., Куракина Е.А.** К анализу характеристик лазерного цифрового сканера на основе технологии DLP для прецизионного контроля качества изделий 108

Подписной индекс научного журнала 85768 по интернет-каталогу «Пресса России».

Научный журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ производствами (технические науки);

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды производствами (технические науки);

2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

Editor-in-Chief

Filipovich O.V., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Deputy Editor-in-Chief

Balakin A.I., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Scientific Editor

Bokhonsky A.I., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Editorial Board

Vartanov M.V., doctor of technical sciences, professor (Moscow)

Grekov N.A., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Doronina Yu.V., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Zhmud V.A., doctor of technical sciences, docent (Novosibirsk)

Krasnodubets L.A., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Moiseev D.V., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Obzherin Yu.E., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Osipov K.N., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Peschanskiy A.I., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Petreshin D.I., doctor of technical sciences, professor (Bryansk)

Preis V.V., doctor of technical sciences, professor (Tula)

Schenyatsky A.V., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Zamoryonov M.V., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Maystrishin M.M., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Rapatsky Yu.L., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Kamtsev V.A., Filipovich O.V.** Identifying the distributions of random measurement error components using artificial neural networks 4
- Grushun A.I., Grushun T.A., Osadchenko A.E., Karapetyan V.A.** Evaluation of the speed of the automatic control system of an industrial robot 22
- Tolokonsky A.O., Menyuk D.S.** Comparative analysis of traditional methods for parametric optimization of automatic controllers in NPPs and an approach using analytical simulators 31
- Shlaev V.I., Bilchuk M.V.** Generalized model for automating the quality control process of instrument engineering products 43
- Tugashova L.G., Tagirov A.F.** Automation and control of a microbial protein production unit based on multiple-contour systems 54
- Zhmud V.A., Asset A., Akhmetova A.M., Abdildayeva A.A.** Optimization using artificial intelligence of water pressure in water supply dispatching 65

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

- Shchetinin E.Yu., Pestryakova A.V.** Development of a model of spatio-temporal transformer and its use for automated diagnosis of heart rhythm pathologies 74
- Osipov K.N.** The model of predictive forecasting of welding joint parameters 87
- Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Ryzhkov A.I.** Distribution functions of random variables and their functionals 95
- Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Maystrishin M.M.** Equivalent in energy capacity relay acceleration reversibly designed 102

MEASURING INSTRUMENTS AND METHODS

- Zuev S.M., Debelov V.V., Kurakina E.A.** To the analysis of the characteristics of a laser digital scanner based on DLP technology for precision quality control of products 108

Subscription index of the scientific journal is 85768 according to the Internet catalogue "Press of Russia".

The scientific journal is included in the "List of peer-reviewed scientific editions, in which the main results of dissertations for the degree of Candidate of sciences, for the degree of Doctor of sciences should be published", approved by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, in the following scientific specialties:

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and software packages

2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment

2.3.3. Automation and control of technological processes and productions

Founder and publisher: FSAEI HE «Sevastopol State University» ul. Universitetskaya, 33. Sevastopol, 299053.

© FSAEI HE «Sevastopol State University»

© Authors of the articles

УДК 004.032.26:621.9.08

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЛУЧАЙНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Камцев В.А.¹, Филипович О.В.²

**IDENTIFYING THE DISTRIBUTIONS OF RANDOM
MEASUREMENT ERROR COMPONENTS USING ARTIFICIAL
NEURAL NETWORKS**

Kamtsev V.A.¹, Filipovich O.V.²

Аннотация. Предложен метод идентификации законов распределений случайных составляющих погрешностей измерения и нахождения оценок их параметров с применением моделей на основе свёрточных нейронных сетей. Рассмотрены архитектуры моделей, алгоритм их обучения и порядок генерации обучающих данных. Приведены графики процесса обучения моделей, результаты испытаний обученных моделей на синтетических и экспериментальных данных. Произведена оценка достоверности и адекватности результатов предсказаний моделей путём сравнения с классическими статистическими методами и методом выбора вида распределения по информационному критерию Акаике.

Annotation. A method is proposed for identifying the probability distributions of random measurement errors components and estimating their parameters using convolutional neural network-based models. The architectures of the models, their training algorithm, and the procedure for generating training data are described. Training curves are presented, along with the results of testing the trained models on both synthetic and experimental data. The reliability and adequacy of the model predictions are evaluated by comparing them with classical statistical methods and with the distribution selection approach based on the Akaike information criterion (AIC).

Ключевые слова. Погрешность измерения, случайная составляющая, идентификация распределений, искусственные нейронные сети, классификация, регрессия параметров, информационный критерий Акаике.

Keywords. Measurement error, random component, distributions identification, artificial neural networks, classification, parameters regression, Akaike information criterion.

Введение.

В [1] была поставлена задача анализа распределений случайных составляющих погрешностей при измерениях размеров деталей. Рассматривались вопросы определения вида и параметров закона распределения с помощью критерия согласия Пирсона и других статистических методов. Несмотря на высокую достоверность и адекватность классических подходов, им присущи некоторые ограничения, которые возможно обойти, решая аналогичные задачи путём применения

методов машинного обучения. В дальнейшем будут рассмотрены законы нормальный, треугольный и равномерный, как наиболее применяемые для описания распределений случайных составляющих погрешностей измерений [2].

Целью работы является разработка нейросетевой модели с использованием свёрточных слоёв для идентификации распределения случайных составляющих погрешностей измерений и оценки его параметров.

Для идентификации закона распределения и регрессии его параметров предлагается использовать искусственные нейронные сети (нейросети). Они построены по принципу организации биологических нейронных сетей и являются одним из видов математических моделей (нейросетевые модели) – функций вида:

$$Y = F(V, \theta), \quad (1)$$

где V – вектор входных данных (некоторая выборка значений), θ – параметры (веса и смещения), Y – вектор выходных данных (предсказание модели), F – структура (архитектура) сети: нейронные слои, функции затрат, оптимизаторы, схемы инициализации, функции активации, схемы регуляризации.

Функция (1) моделирует статистическую зависимость между величинами V и Y , выявленную в ходе обучения – подбора комбинации параметров нейронной сети, доставляющей оптимальное значение (минимум) функции затрат с использованием априорно известных (обучающих) данных. Построенные таким образом модели используются для решения задач регрессии, классификации, обобщения и интерпретации данных [3].

Если поставить цель разработки одной модели, удовлетворительно решающей обе принципиально различные задачи классификации типа распределения и нахождения значения его параметров, значительно возрастут требования к сложности её архитектуры, а процесс обучения потребует больше ресурсных и временных затрат. В связи с этим, разработано несколько более простых моделей: идентификация вида распределения производилась классификатором, а нахождение оценок параметров – регрессорами (каждому виду закона ставится в соответствие одна модель).

Для решения поставленных задач с помощью нейросетевых моделей используются два вида архитектур [4]:

- полносвязная, также известная как многослойный персептрон (*Multilayer Perceptron, MLP*). В качестве примера в [5,6] приводятся результаты использования *MLP* при аппроксимации различных видов плотностей вероятностей, включая случаи смешанного распределения;

- свёрточная (*Convolutional Neural Network, CNN*). Данный вид архитектуры был использован в [7] для классификации законов распределений и в [8] для прогнозирования временных рядов высокой размерности.

Из преимуществ полносвязных нейросетей можно выделить простоту реализации и небольшую погрешность решения задачи регрессии

при малом количестве оцениваемых параметров законов распределений. Но главными недостатками, ограничивающими применимость *MLP* при определении типа распределения выборок, являются:

- невозможность учёта локальных признаков формы кривой плотности вероятности;
- отсутствие инвариантности к сдвигу и масштабу выборок и, как следствие, низкая способность к обобщению вне диапазонов обучающих данных;
- требование фиксированной длины входа; невозможность работы с выборками различного размера.

Подобные недостатки не относятся к *CNN*, в связи с чем их выбор является предпочтительным. Тем не менее, данный вид архитектуры отличается низкой интерпретируемостью результатов работы модели (например, затруднительно определить решающий фактор, повлиявший на результат классификации). В связи с этим предлагается использование гибридного подхода к выбору архитектуры нейросетевых моделей: свёрточные слои оценивают выраженность характерных признаков формы кривой плотности вероятности, а полносвязные слои производят интерпретацию выявленного набора признаков и формируют конечный ответ модели. Разработанные архитектуры модели-классификатора и моделей-регрессоров представлены на Рис. 1.

Архитектура модели-классификатора и моделей-регрессоров.

В архитектуре модели-классификатора первый слой является свёрточным. Он «просматривает» вектор входных данных 32 различными «шаблонами» (фильтрами) с размером (ядра) 10 значений, чтобы найти в нём некоторые признаки (паттерны). К ним относятся, например, наличие в форме закона распределения линейных или горизонтальных участков, величина тяжести хвостов, степень асимметрии. Далее применяется операция одномерного максимального пуллинга (*Max Pooling*) с размером окна 5, которая сжимает входные данные, оставляя информацию только о наиболее выраженных относительно простых паттернах. Потом следуют аналогичные свёрточный слой и слой максимального пуллинга, но с количеством фильтров 64 для выделения более сложных паттернов.

После свёрточных слоёв идёт слой одномерного глобального пуллинга (*1-D Global Pooling*). Он необходим для того, чтобы модель была невосприимчива к изменениям размера входной выборки. Далее следует один полносвязный слой, содержащий 64 нейрона. Он обобщает информацию о выраженности паттернов входных данных, полученной свёрточными слоями, и преобразует её в вероятности принадлежности выборки к тому или иному закону распределения. Сами вероятности подаются на выходной слой, содержащий 3 нейрона: по одному на каждый из законов распределения.

Для двух свёрточных и первого полносвязного слоёв используется *ReLU* функция активации $r(p) = \max(0, p)$. Чтобы сумма вероятностей принадлежности выборки к тому или иному закону распределения была равна единице, для выходного слоя выбрана функция *Softmax*, которая производит нормализацию предсказанных вероятностей [3].

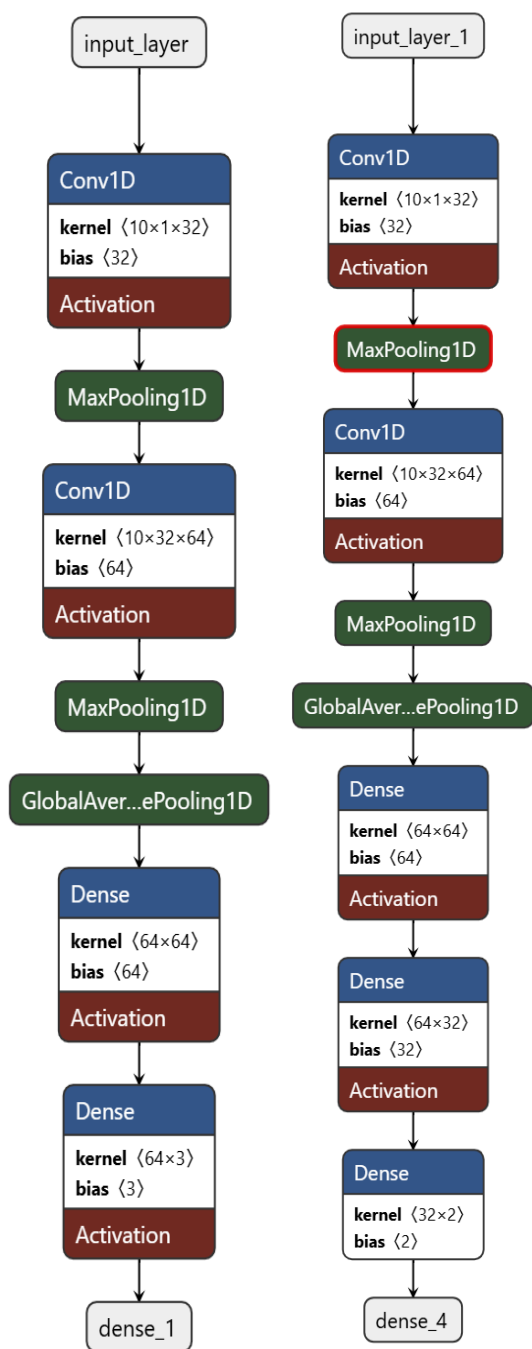


Рис. 1 – Архитектура модели-классификатора (слева) и модели-регрессора (справа)

способ обучения с учителем и является более распространённым. Он предполагает, что для каждого входного вектора существует некий эталонный вектор, представляющий собой требуемый выход (обучающая пара). Множество обучающих пар формируют набор обучающих данных или датасет (*Dataset*). Процесс обучения модели заключается в обновлении весов искусственной нейронной сети на основе градиента функции потерь.

Архитектура моделей-регрессоров является схожей, отличия заключаются в следующем:

- размер окна максимального пуллинга уменьшен до 2;
- перед выходным слоем добавлен ещё один полносвязный слой, содержащий 32 нейрона;
- количество нейронов в выходном слое варьируется и равно количеству параметров закона соответствующего регрессора (1 – нормальный закон, 2 – равномерный закон, 3 – закон Симпсона);
- функция активации выходного слоя изменена на линейную (*Linear*).

Принцип обучения моделей. Порядок генерации набора обучающих данных.

По характеру обучения нейронные сети подразделяются на два типа: использующие обучение с учителем и без учителя. Обучение без учителя является наиболее близкой моделью обучения с точки зрения биологических корней искусственных нейронных сетей. Она была первоначально предложена Кохоненом Т.К. и не требует сравнения с predetermined идеальными ответами: обучающее множество формируется лишь из входных векторов (пример с использованием двумерных сетей Кохонена для анализа законов распределения выборок описан в [9]). Тем не менее, подобный подход позволяет произвести только косвенную оценку качества моделей, а интерпретация предсказаний в некоторых случаях может оказаться затруднительной.

Данных недостатков лишён способ обучения с учителем и является более распространённым. Он предполагает, что для каждого входного вектора существует некий эталонный вектор, представляющий собой требуемый выход (обучающая пара). Множество обучающих пар формируют набор обучающих данных или датасет (*Dataset*). Процесс обучения модели заключается в обновлении весов искусственной нейронной сети на основе градиента функции потерь.

Веса подстраиваются под каждую обучающую пару датасета до тех пор, пока не будет найден глобальный минимум функции. Тогда утверждается, что соответствующая комбинация весов признаётся оптимальной и обеспечивающей наибольшую адекватность модели. В дальнейшем был использован именно такой подход к обучению нейросетевых моделей [3].

В качестве алгоритма оптимизации для всех моделей был выбран улучшенный метод градиентного спуска *adamW* (параметры: *learning_rate* = 0,0005, *weight_decay* = 0,0001).

У классификатора в качестве целевой функции обычно выступает категориальная кросс-энтропия для многоклассовой классификации,

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C z_{i,c} \log(\hat{z}_{i,c}), \quad (2)$$

где N – размер батча, C – количество классов, $z_{i,c}$ – истинная вероятность принадлежности i -ой выборки к классу c , $\hat{z}_{i,c}$ – предсказанная вероятность принадлежности i -ой выборки к классу c [10].

В рамках решаемой задачи был выбран $N = 32$. Также применялось *one-hot* кодирование, поэтому $z_{i,c} = 1$, если c – истинный класс, и $z_{i,c} = 0$ в противном случае. Тогда (2) упрощается и записывается следующим образом:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} \log(\hat{z}_{i,k_i}),$$

где k_i – индекс истинного класса для i -ой выборки.

У регрессоров целевой функцией является среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \hat{z}_i)^2,$$

где N – количество параметров закона распределения, z_i – истинное значение i -го параметра, $\hat{z}_i$ – предсказанное моделью значение i -го параметра.

Для оценки работы моделей в качестве метрик для классификатора выбрана доля правильных предсказаний, а для регрессоров – средняя абсолютная ошибка (*MAE*). Поскольку количество выходных параметров регрессоров варьируется, находится общая (усреднённая) *MAE* – среднее абсолютное отклонение по всем выборкам и по всем выходным параметрам:

$$MAE = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |z_{ij} - \hat{z}_{ij}|,$$

где n – количество выборок, m – количество выходных параметров, z_{ij} и

$\hat{z}_{ij}$ – истинное и предсказанное значения j -го параметра для i -ой выборки соответственно. Поскольку все параметры для каждого из рассматриваемых законов распределения имеют масштаб в пределах одного порядка, получаемые значения метрики являются корректными.

Максимальное количество эпох обучения принималось равным 10. Предусмотрена ранняя остановка (*Early Stopping*): 5 эпох по значению функции потерь на валидационной выборке.

Для обучения моделей был использован датасет, который представляет собой двумерный массив из 900000 выборок. Все выборки распределены по нормальному, треугольному или равномерному закону в одинаковом соотношении.

Предполагается, что номинальные значения линейных размеров деталей заранее известны. Тогда, получив в результате измерений действительные значения контролируемых размеров, возможно найти соответствующие отклонения от номиналов. При разбиении расширенного интервала допуска на селективные группы часто принимают в качестве середины интервала номинальные значения параметров и в дальнейшем рассматривают только отклонения от них. Таким образом, задачи классификации и регрессии несколько упрощаются, поскольку датасет для обучения нейросетевых моделей возможно сформировать из выборок, математическое ожидание которых приравнивается условному нулю. Среднеквадратическое отклонение выборок выбиралось случайным образом в диапазоне от 3 до 60 мкм.

Если допуск для размеров принять в 5,6...6,4 раз больше СКО, то по ГОСТ 25346 модели показывают наиболее близкие к истинным результаты в пределах от 8 до 11 качества. Датасет не содержал данных из всех прочих классов точности и интервалов размеров ввиду высоких требований к объёму оперативной памяти и большой продолжительности обучения, в связи с чем результаты работы моделей будут становиться всё менее достоверными. Чтобы модель была способна успешно идентифицировать закон распределения и находить его параметры в том числе на незатронутых данных, достаточно расширить датасет и, либо увеличить глубину уже построенной нейронной сети, либо реализовать условную архитектуру модели (*Multi-Backbone Architectures*), где для каждого диапазона значений и качеств будет выбираться соответствующий основной блок (*Backbone*).

Длина каждой выборки в датасете варьируется в диапазоне от 900 до 1000 значений. Поскольку непосредственно из набора выборок различных длин сформировать двумерный массив не представляется возможным, каждую из них необходимо предварительно привести к одинаковой длине в 1000 значений. Для этого была применена операция паддинга (*Padding*) – добавления дополнительных значений (например, нулей) к концу выборки до достижения требуемой её длины. Ввиду применения ко входным данным операций максимального пуллинга, глобального пуллинга и наличия полносвязных слоёв после свёрточных, обобщающей способности модели достаточно для успешной обработки выборок размеров вне диапазона обучающих данных.

В случае нормального закона распределения плотность вероятности

$$f_N(p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(p-M)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где M – математическое ожидание и σ – СКО, генерация выборок происходит по заранее известным значениям M и σ .

В случае равномерного закона распределения плотность вероятности

$$f_U(p) = \begin{cases} 0, & \text{при } p < \alpha, \\ \frac{1}{\beta - \alpha}, & \text{при } \alpha \leq p \leq \beta, \\ 0, & \text{при } p > \beta, \end{cases}$$

где α и β – нижняя и верхняя границы интервала равномерного распределения соответственно, генерация выборки требует в качестве аргументов значения α и β . Поэтому возникает задача выразить эти параметры через известные математические ожидания и СКО.

Для равномерного закона распределения СКО

$$\sigma = \frac{\beta - \alpha}{\sqrt{12}}, \quad (3)$$

откуда $\beta - \alpha = \sigma\sqrt{12} = 2\sigma\sqrt{3}$, и $\alpha = -\sigma\sqrt{3}$, $\beta = \sigma\sqrt{3}$.

В случае треугольного закона распределения плотность вероятности

$$f_T(p) = \begin{cases} 0, & \text{при } p < a, \\ \frac{2(p-a)}{(b-a)(c-a)}, & \text{при } a \leq p < c, \\ \frac{2}{b-a}, & \text{при } p = c, \\ \frac{2(b-p)}{(b-a)(b-c)}, & \text{при } c < p \leq b, \\ 0, & \text{при } b < p, \end{cases}$$

где a , b и c – нижний предел, верхний предел и мода соответственно, возникает аналогичная задача, но с тем отличием, что неизвестных параметров уже три. В связи с этим производится 100 попыток генерации выборки в соответствии со следующим алгоритмом:

1) генерируется случайным образом значение $skew$ доли моды между левой и правой границей в диапазоне от 0,05 до 0,95 и целевое значение СКО σ ;

2) в качестве начального приближения фиксируются

$$a_0 = -1, c_0 = 2 \cdot skew - 1, b_0 = -a_0 - c_0, \quad (4)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{a_0^2 + b_0^2 + c_0^2 - a_0 \cdot b_0 - a_0 \cdot c_0 - b_0 \cdot c_0}{18}}; \quad (5)$$

3) вычисляются конечные значения параметров

$$a = a_0 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad b = b_0 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad c = c_0 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_0};$$

4) производится проверка полученного значения c : если $c \notin (a, b)$, то необходимо перейти к пункту 1, иначе – сгенерировать выборку.

Поскольку генерация каждой выборки происходит в разных масштабах, то модель при обучении будет воспринимать выборки с большим масштабом как более важные и игнорировать выборки с меньшим масштабом. Для устранения данного явления необходимо привести все выборки к одинаковому диапазону – нормализовать. В данной работе использовалась *Min-Max* нормализация, которая приводит данные к диапазону $[0, 1]$ в соответствии с формулой:

$$v_{norm} = \frac{v - v_{min}}{v_{max} - v_{min}},$$

где v_{min} и v_{max} – минимальные и максимальные значения нормализуемых данных соответственно.

Соотношение обучающей и тестовой выборок составляет 0,8 к 0,2. Обучение *Min-Max Scaler* происходило только на обучающих выборках. Далее происходит его сохранение в файл, чтобы иметь возможность предварительно нормализовать новые входные выборки при дальнейшей работе модели.

Квалиметрия моделей.

Для оценки моделей с целью выбора наиболее предпочтительной при решении рассматриваемой проблемы в рамках направления квалиметрии моделей ставятся следующие задачи:

1) из разных вариантов моделей выбрать наиболее предпочтительный;

2) определить степень достоверности и адекватности модели;

3) отнести модель к заданной категории качества.

К моделям-претендентам предъявляется требование к сопоставимости по адекватности входным данным. Говоря в общем, нейросетевые модели не имеют структурного соответствия моделируемому объекту, поскольку их структура определяется особенностями решаемой задачи, но находятся в отношении функционального подобия объекту-оригиналу. Если нейросетевые и классические модели обладают разной структурой, на функциональном уровне они могут быть сопоставимы [11]. Таким образом, предлагается оценивать качество разработанных моделей путём сравнения их с традиционными моделями, которые априори решают аналогичные задачи в высокой степени адекватно и достоверно.

Для решения задачи регрессии параметров реализован способ их нахождения с использованием методов математической статистики. Для случая с нормальным распределением пусть $V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_N)$ – выборка, N – длина выборки, v_i – i -ое значение выборки. Тогда выборочная оценка СКО

$$\tilde{\sigma}(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \tilde{M}(V))^2}{N-1}}. \quad (6)$$

При треугольном законе распределения выборочные оценки $\tilde{a}$, $\tilde{b}$ параметров a и b вычислялись следующим образом:

$$\tilde{a} = \min(V), \quad (7)$$

$$\tilde{b} = \max(V). \quad (8)$$

Выборочная оценка $\tilde{c}$ параметра c вычисляется аналогично (4): $\tilde{c} = -\tilde{a} - \tilde{b}$.

Выборочная оценка СКО, определялась по аналогии с (5).

Для равномерного закона распределения выборочные оценки $\tilde{a}$, $\tilde{b}$ параметров a и b вычислялись аналогично (7) и (8), выборочная оценка СКО $\tilde{\sigma}(V)$ – аналогично (3).

Согласно [12], при наличии априорной информации о виде закона распределения и значений оценок его параметров рекомендуется использовать метод оценки максимума правдоподобия (*Maximum Likelihood Estimation, MLE*). Однако в тех случаях, когда значения *MLE* для двух и более законов распределений почти неотличимы, отдаётся предпочтение закону с большим *MLE* без учёта его «сложности» (количества оцениваемых параметров). Для выбора наилучшего закона распределения с учётом качества аппроксимации и его «сложности» предлагается использование сочетания *MLE* с информационным критерием Акаике (*AIC*) [13].

Сущность метода заключается в том, что каждому закону ставится в соответствие своё значение *AIC*. Закон, которому соответствует минимальное значение критерия, признаётся наилучшим. Вычисляется *AIC* следующим образом:

$$AIC = 2k - 2l(T),$$

где T – вектор оцениваемых параметров, k – количество параметров (для нормального закона $k = 1$, для равномерного – $k = 2$, а для треугольного – $k = 3$), $l(T) = \ln(L(T))$ – логарифмическая функция правдоподобия, определяющаяся как

$$l(T) = \ln L(T) = \ln \left(\prod_{i=1}^N f(v_i | T) \right) = \sum_{i=1}^N \ln f(v_i | T).$$

Максимальное значение функции правдоподобия наблюдается при следующих значениях оценок параметров:

- для нормального закона: СКО, вычисляемое аналогично (6);
- для равномерного закона: нижняя и верхняя граница, вычисляемые аналогично (7) и (8);
- для треугольного закона: нижняя и верхняя граница, вычисляемые аналогично (7) и (8), и мода, грубая оценка которой принималась равной медиане выборки.

Обучение и тестирование.

Программная реализация классического метода идентификации закона распределения и регрессии его параметров производилась на интерпретируемом языке программирования *Python* в интегрированной среде *Spyder*. Разработка архитектур нейросетевых моделей и их обучение осуществлялось посредством *API Keras* фреймворка *Tensorflow*. Несмотря на то, что языки *StatSoft STATISTICA* и *R* предоставляют схожий набор инструментов, только *Keras/Tensorflow* позволяет вести разработку моделей с наличием свёрточных слоёв в контексте глубокого обучения [14,15].

Процесс обучения классификатора показан на Рис. 2.

Обе кривые на протяжении всех эпох растут и постепенно сходятся, причём на последней эпохе рост не прекращается, что говорит о том, что имело бы смысл увеличить количество эпох обучения. Наблюдаются небольшие колебания валидационной кривой, которые не влияют в целом на процесс обучения. На валидационной выборке за все эпохи максимальная доля правильных предсказаний (*Accuracy*) составляла 0,984.

Процесс обучения регрессора параметров закона распределения Гаусса показан на Рис. 3.

На обучающей выборке средняя абсолютная ошибка снижается от эпохи к эпохе. На валидационной выборке основное уменьшение ошибки происходит после второй эпохи, далее происходит колебание данного показателя. Причиной колебаний может быть слишком большое значение параметра *learning_rate* оптимизатора (из-за слишком большого шага происходит «перескок» экстремума функции потерь) или слишком маленький размер валидационной выборки (например, выбрать соотношение обучающей и валидационной выборок 0,7 к 0,3). На валидационной выборке за все эпохи минимальная MAE составляла 0,011.

Средняя абсолютная ошибка модели по мере обучения равномерно падает как на обучающей, так и на валидационной выборках, кривые сходятся. На валидационной выборке за все эпохи минимальная MAE составляла 0,013.

Процесс обучения регрессора параметров равномерного закона распределения показан на Рис. 4.

Средняя абсолютная ошибка модели по мере обучения равномерно падает как на обучающей, так и на валидационной выборках. Наблюдаются колебания валидационной кривой, которые не влияют в целом на процесс обучения. Кривые не совпадают, что говорит о незначительном переобучении. На валидационной выборке за все эпохи минимальная MAE составляла 0,008.

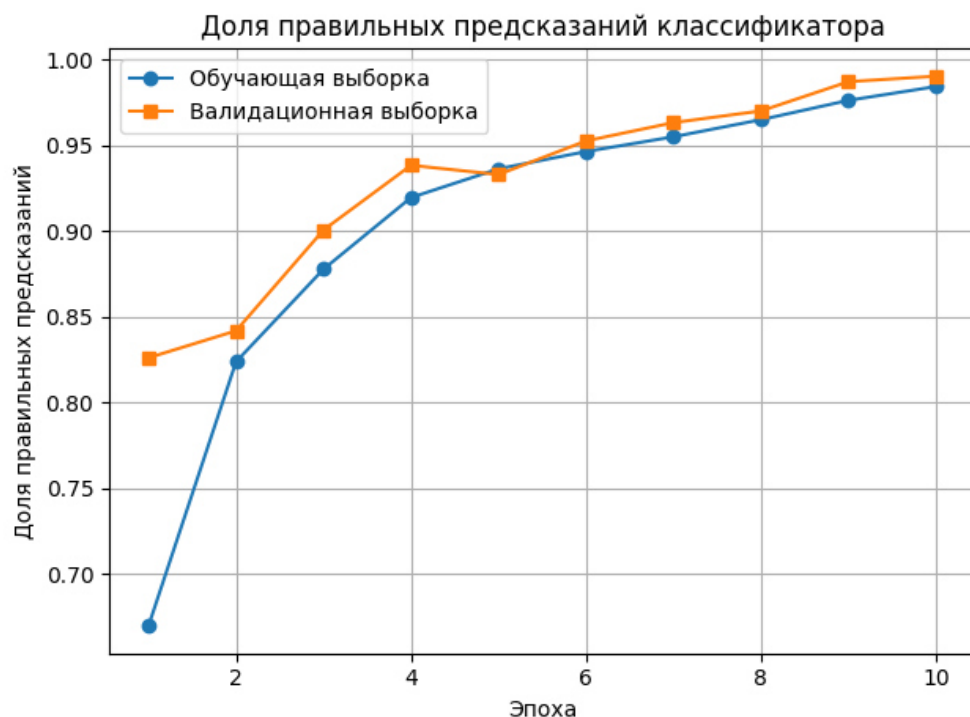


Рис. 2 – Процесс обучения классификатора

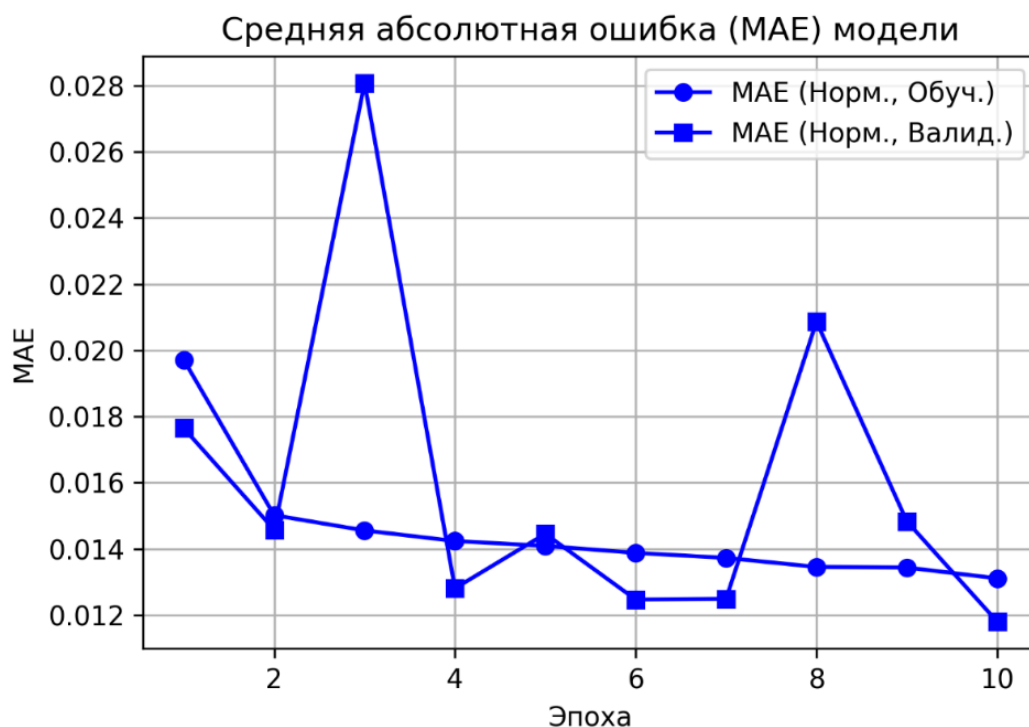


Рис. 3 – Процесс обучения регрессора (закон распределения Гаусса)

Процесс обучения регрессора параметров закона распределения Симпсона показан на Рис. 5.

После обучения модели сохраняются в файлы с расширением *.keras*, а *MinMax Scaler* – *.joblib*. Перед началом работы всё содержимое данных файлов должно быть импортировано в рабочую пространство Spyder.



Рис. 4 – Процесс обучения регрессора (равномерный закон распределения)

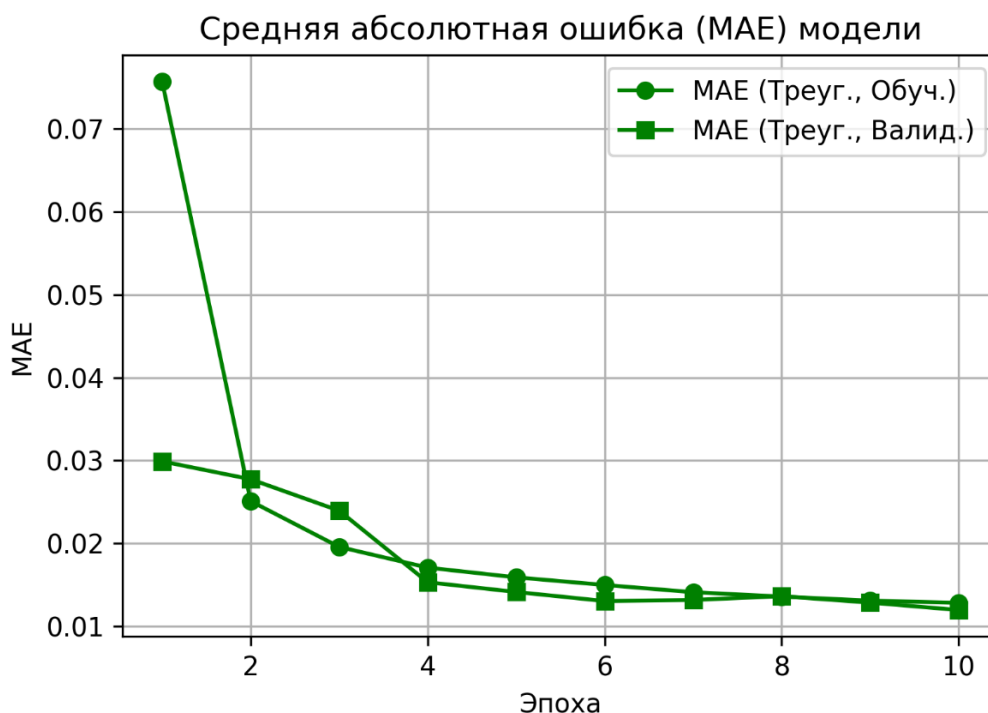


Рис. 5 – Процесс обучения регрессора (закон распределения Симпсона)

После вызова модели для обработки требуемой выборки в консоль выводятся значения AIC для трёх законов распределения, решение моделью задачи классификации, истинные значения параметров закона, предсказанные моделью параметры закона и значения параметров, полученные в результате статистической обработки выборки.

На Рис. 6-8 показаны примеры использования моделей на выборках с различными законами распределения и разными длинами. Выборки генерируются с использованием тех же функций, с помощью которых происходило формирование обучающих датасетов. Для прочих датасетов необходимо предварительно их добавить в рабочее пространство в качестве переменной и нормализовать с использованием ранее импортированного объекта *MinMax Scaler*.

Оба метода дают схожие результаты при решении и задачи классификации, и задачи регрессии. Для первой задачи предсказания нейросетевой модели не совпадали с результатами классификации методом Акаике 63 раза из 1000 испытаний, что соответствует доле правильных ответов модели в 0,937. Поскольку выборочные оценки параметров, используемые при реализации метода Акаике, не являются истинными значениями параметров, полученное значение *Accuracy* является априори меньшим, чем в процессе обучения модели.

Для второй задачи находилось среднее абсолютное отклонение оценочных значений параметров (предсказаний нейросетевых моделей) от истинных после проведения 1000 испытаний для каждого из законов распределения в отдельности. Результаты сведены в таблицы 1 и 2.

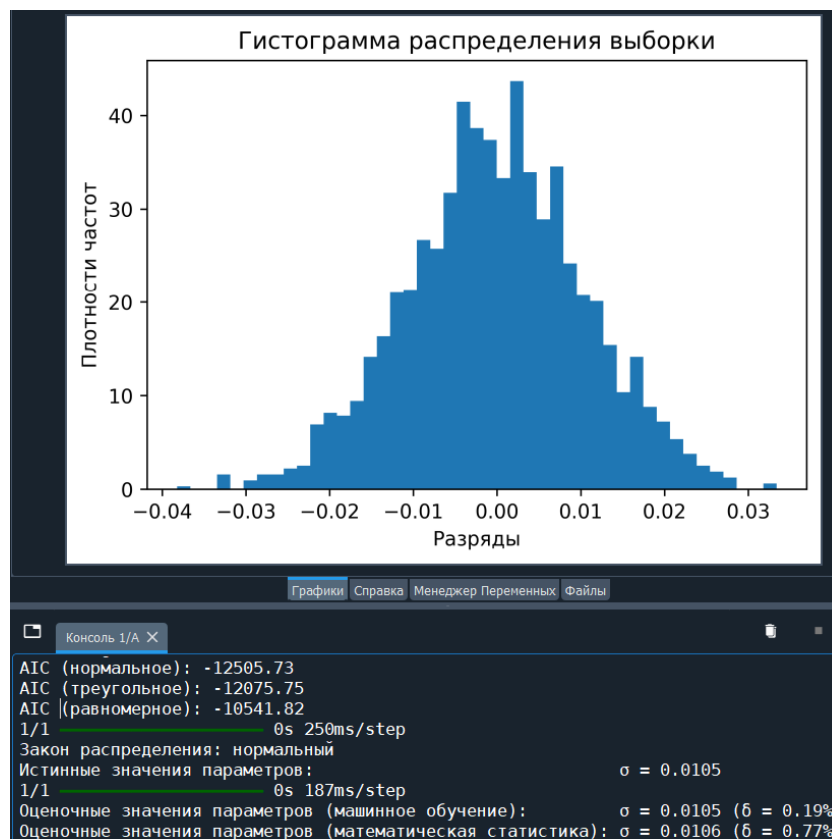


Рис. 6 – Гистограмма распределения выборки (2000 значений, распределение нормальное) и результат работы модели

Наибольшая средняя абсолютная погрешность соответствует случаю с равномерным распределением выборки: 2,97 мкм при нахождении значений параметра α .

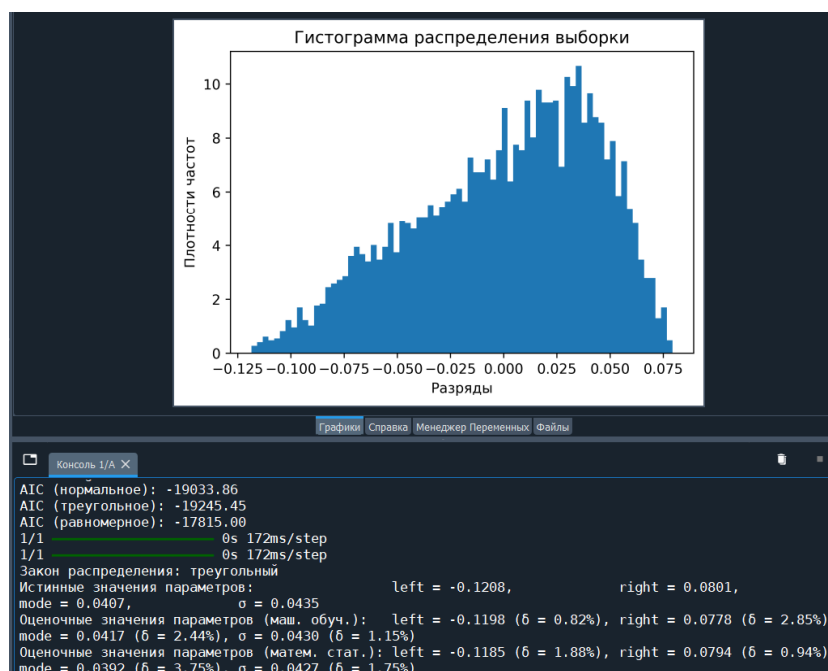


Рис. 7 – Гистограмма распределения выборки (5500 значений, распределение треугольное) и результат работы модели



Рис. 8 – Гистограмма распределения выборки (500 значений, распределение равномерное) и результат работы модели

В заключение обученные модели были применены для обработки экспериментальных данных, описанных в [1]. Для случая с обработкой результатов измерений с использованием индуктивного датчика было показано, что закон распределения выборки является нормальным. На

выборке из значений погрешности измерений информационный критерий Акаике принимает значения:

- 1) - 612,10 для нормального закона;
- 2) - 611,97 для треугольного закона;
- 3) - 597,34 для равномерного закона.

Таблица 1 – Абсолютные погрешности (в мкм) определения параметров законов относительно их истинных значений с помощью нейросетевых моделей (н.м.) и методов математической статистики (м.с.)

	σ		a (треуг.), α (равн.)		b (треуг.), β (равн.)		c	
	н.м.	м.с.	н.м.	м.с.	н.м.	м.с.	н.м.	м.с.
Норм.	0,83	0,55	-	-	-	-	-	-
Треуг.	0,61	1,32	2,20	2,53	1,71	3,26	2,81	3,27
Равн.	1,63	0,067	2,97	0,12	2,67	0,11	-	-

Таблица 2 – Абсолютные погрешности (в мкм) определения параметров с помощью нейросетевых моделей относительно их значений, определяемых с помощью методов математической статистики

	σ	a	b	c
Норм.	0,68	-	-	-
Треуг.	1,62	4,00	3,53	3,98
Равн.	1,56	2,85	2,56	-

Таким образом, по значению AIC закон распределения выборки принимается нормальным. Стоит отметить большое сходство значений критерия для нормального и треугольного законов.

В результате идентификации типа распределения выборки модель относит его к нормальному. Предсказанное значение СКО – 15 мкм, что соответствует относительному отклонению от 14,7 мкм в 2,04%.

При обработке экспериментальных данных, собранных посредством использования штангенциркуля цифрового, были получены следующие результаты. По значению AIC закон распределения выборки принимается нормальным:

- 1) - 728,43 для нормального закона;
- 2) - 712,40 для треугольного закона;
- 3) - 646,43 для равномерного закона.

Обученная модель относит тип распределения к нормальному, оценочное значение СКО – 9,2 мкм (относительное отклонение от 8,67 мкм в 5,76%).

Заключение.

Среди преимуществ подхода использования моделей на основе искусственных нейронных сетей для решения задач классификации закона распределения выборок и регрессии его параметров можно выделить:

– высокая скорость предсказания после обучения. Например, для подгонки нескольких законов распределений на большом числе выборок метод максимального правдоподобия может быть медленным. Модель же делает предсказание за время, не превышающее одной секунды;

– возможность работы с выборками малых размеров и устойчивость к наличию ошибочных значений во входных данных. В то время как

достоверность классических методов в условиях присутствия ошибочных значений (промахов) или на выборках малой длины снижается, при наличии корректно сформированного обучающего датасета нейросеть может научиться игнорированию «шума» и обобщению даже на небольших выборках;

– полная автоматизация процесса обработки входных данных. Например, критерий Колмогорова-Смирнова, тест χ^2 , информационные критерии требуют участия эксперта, поскольку имеется потребность в интерпретации промежуточных результатов и принятии соответствующих решений на основе контекста решаемой задачи. Обученные нейросетевые модели производят обработку входных данных автоматически и генерируют предсказания в виде, не требующем дальнейшей интерпретации.

К главным недостаткам можно отнести:

– высокие требования к объёму и качеству набора обучающих данных;

– увеличение вероятности генерации ложного предсказания при работе нейросетевых моделей вне области обучения;

– на выборках большого размера без ошибочных значений и с явно выраженным законом распределения классические методы производят оценку параметров с меньшей погрешностью.

Результаты решения обученными моделями задач определения типа распределения выборки и нахождения параметров законов распределения согласуются с результатами обработки данных эксперимента в [1]. Таким образом, эффекта переобучения нейросети не наблюдается, и она может быть успешно использована при решении обеих поставленных задач в реальных условиях. Дальнейшее улучшение качества работы моделей возможно путём:

– расширения диапазона варьирования среднеквадратического отклонения выборок датасета в процессе обучения нейросетей для обеспечения возможности их использования на большем количестве классов точности изготовления деталей;

– увеличения количества видов идентифицируемых видов распределений. Например, в [7] осуществлена идентификация 9 законов распределений путём дополнительного учёта значений начальных и центральных моментов выборки более высоких порядков;

– применения байесовского (вероятностного) подхода к обучению моделей. В этом случае весовые коэффициенты нейросетей будут рассматриваться как случайные величины с заранее заданным законом распределения, что в итоге позволит оценить степень неопределённости предсказаний моделей. Так, например, в [15] реализован подобный подход для классификации видов распределений экспоненциального, Эрланга и Вейбулла.

Библиографический список.

1. Филипович О.В. Анализ распределений случайных составляющих погрешностей статистическими методами при измерениях размеров деталей / О.В. Филипович, В.А. Камцев, Н.А. Балакина [и др.] //

- Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. – № 2(30). – С. 112-119.
2. Копп В.Я. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино- приборостроении: [монография] / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь: [б. и.], 2020. – 336 с.: ил., табл.; 20 см. – ISBN 978-5-9500585-9-2.
 3. Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
 4. Rothfuss J. Conditional Density Estimation with Neural Networks: Best Practices and Benchmarks / J. Rothfuss, F. Ferreira, S. Walther [et al.] // Research Papers in Economics. – 2019. – DOI: 10.48550/arXiv.1903.00954.
 5. Touba M. Probability density function estimation using Multi-layer perceptron // M. Touba, T. Abdenacer, S. Touba [et al.] // The Online Journal of Science and Technology. – 2015. – Vol. 5. – № 2. – P. 54-63.
 6. Прохоров С.А. Определение функциональных характеристик случайных процессов методами аппроксимации и нейросетевого анализа и их сравнение / С.А. Прохоров, И.А. Лёзин, И.В. Лёзина // Вестник СамГТУ. – 2005. – № 33. – С. 340-346.
 7. Khoussi S. Neural Networks for Classifying Probability Distributions / S. Khoussi, A. Heckert, A. Battou [et al.] // NIST. – 2021. – DOI: 10.6028/NIST.TN.2152.
 8. Yitian C. Probabilistic Forecasting with Temporal Convolutional Neural Network / C. Yitian, K. Yanfei, C. Yixiong [et al.] // Neurocomputing. – 2019. – DOI: 10.48550/arXiv.1906.04397.
 9. Лёзина И.В. Автоматизированная система идентификации законов распределения двумерной нейронной сетью Кохонена / И.В. Лёзина, Н.Ю. Яшин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4(2). – С. 344-349.
 10. Rubinstein R.Y. The cross-entropy method: a unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo simulation, and machine learning / R.Y. Rubinstein, D.P. Kroese. – New York : Springer, 2004. – 316 p. – ISBN: 978-1-4419-1940-3
 11. Микони С.В. О квалиметрии моделей систем искусственного интеллекта / С.В. Микони, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2017: Материалы X Всероссийской мультikonференции, с. Дивноморское, Геленджик, 11-16 сентября 2017 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. – С. 79-84.
 12. Акимов С.С. Оценка методов восстановления законов распределения вероятности и обоснование предпочтения на основании некоторых свойств эмпирического массива данных / С.С. Акимов // Актуальные вопросы современной науки. – 2014. – № 31. – С. 139-150.
 13. Akaike H. A new look at the statistical model identification / H. Akaike // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, № 6. – P. 716-723. – DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.

14. Delignette-Muller M. Fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions / M. Delignette-Muller, C. Dutang // Journal of Statistical Software. – 2015. – Vol. 64. – № 4. – P. 1-34. – DOI: 10.18637/jss.v064.i04.
15. Заморёнов М.В. Идентификации законов распределения по экспериментальным данным нейронными сетями / М.В. Заморёнов, Л.Е. Карташов, В.Я. Копп // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 4-1 (336). – С. 66-76.

¹*Камцев Вячеслав Андреевич, ассистент, kva_m98@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., доцент, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Kamtsev Vyacheslav Andreevich, Assistant, kva_m98@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Filipovich Oleg Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Грушун А.И.¹, Грушун Т.А.², Осадченко А.Е.³, Карапетьян В.А.⁴

EVALUATION OF THE SPEED OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN INDUSTRIAL ROBOT

Grushun A.I.¹, Grushun T.A.², Osadchenko A.E.³, Karapetyan V.A.⁴

Аннотация. Рассматривается алгебраический метод параметрической оценки быстродействия систем автоматического управления (САУ) промышленных роботов. Классическое решение такой задачи на ЭВМ требует многократного построения и анализа кривых переходного процесса. Предлагается определять быстродействие САУ без непосредственного построения кривой переходного процесса по положительным вещественным корням специальным образом построенных алгебраических уравнений. Вычисление положительных вещественных корней, в отличие от вычисления комплексных корней, не представляет сложности.

Abstract. An algebraic method for parametric evaluation of the speed of automatic control systems (ACS) of industrial robots is considered. The classical solution of such a problem on a computer requires multiple construction and analysis of transient process curves. It is proposed to determine the speed of ACS without directly constructing a transient process curve using positive real roots of specially constructed algebraic equations. Calculating positive real roots, unlike calculating complex roots, is not difficult.

Ключевые слова. Промышленный робот, линейная система автоматического управления, длительность переходного процесса, область устойчивости, область качества, положительные вещественные корни.

Keywords. Industrial robot, linear automatic control system, duration of the transition process, stability area, quality area, positive real roots.

Постановка проблемы.

При настройке или синтезе регулятора САУ промышленного робота, когда требуется определить влияние каких-либо варьируемых параметров на устойчивость, строят область устойчивости системы в пространстве этих варьируемых параметров [1,6,12]. В дальнейшем, внутри полученной области строят подобласть качества с требуемыми (гарантированными) характеристиками, к которым относится и прямой показатель качества — длительность переходного процесса, характеризующий быстродействие САУ. Система, которая является устойчивой, на практике может быть непригодной для решения конкретных задач автоматического управления, если ее быстродействие не удовлетворяют требованиям этих задач [1,6,7,11,12]. Исследование и настройка параметров регулятора САУ промышленного робота, обеспечивающих необходимое качество процессов управления, требует многократного построения и графического анализа кривых

переходного процесса [1,6,7,12]. Для построения переходных характеристик, как правило, применяются методы численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений [7]. Эти методы для САУ, имеющих высокий порядок и сложную структуру, могут столкнуться с существенной проблемой выбора шага и времени интегрирования.

Целью статьи является разработка компьютерного метода построения областей в пространстве двух варьируемых параметров настройки САУ промышленного робота, позволяющих оценить ее быстродействие на основе свойств вещественной частотной характеристики (ВЧХ) замкнутой системы [1,6,7] по действительным нулям особым образом построенных многочленов.

Приведенный в статье метод относится к приближенным методам параметрического анализа САУ, поэтому применяется при первичной оценке качества процессов управления.

Следует отметить, что такой алгебраический подход к решению задач автоматического управления может быть применим для построения областей устойчивости и качества САУ [9], анализа косвенных показателей качества [2], анализа периодических режимов в нелинейных системах [3] и абсолютной устойчивости нелинейных САУ [4].

Построение областей для оценки быстродействия САУ на основе применения положительных вещественных решений специальных алгебраических уравнений.

Будем исследовать САУ электропривода (ЭП) промышленного робота [5,8,10], структурная схема которого изображена на Рис.1 [8].

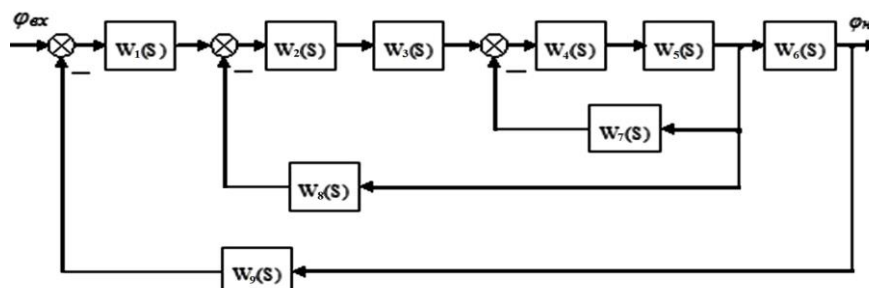


Рис.1 – Структурная схема САУ ЭП промышленного робота

На Рис.1: $W_1(s)=k_p/(T_p s+1)$ передаточная функция регулятора положения; $W_2(s)$ передаточная функция ПИ-регулятора; $W_3(s)$ передаточная функция тиристорного преобразователя; $W_4(s)$, $W_5(s)$, $W_7(s)$ передаточные функции двигателя постоянного тока; $W_6(s)$ передаточная функция механической передачи; $W_8(s)$ передаточная функция измерителя скорости; $W_9(s)$ передаточная функция измерителя угла; φ_n угол поворота звена робота; $\varphi_{вх}$ заданный угол поворота звена робота [8].

Рассмотрим построение области изменения параметров k_p и T_p настройки регулятора положения САУ ЭП промышленного робота [8], внутри которой длительность переходного процесса не будет превышать заданные значения.

Преобразовав структурную схему (Рис.1), можно записать передаточную функцию замкнутой системы в виде:

$$W(s) = \frac{r(s) + k_p m(s) + T_p d(s)}{c(s) + k_p b(s) + T_p a(s)}, \quad (1)$$

где $r(s)$, $m(s)$, $d(s)$, $c(s)$, $b(s)$, $a(s)$ – полиномы с вещественными коэффициентами.

Для построения требуемых областей, в пространстве двух параметров, применим следующий подход. В передаточной функции (1) произведем замену:

$$T_p = k_p \operatorname{tg} \gamma,$$

где $\gamma \in [0; \pi/2)$ угол, определяющий взаимосвязь параметров k_p и T_p . С учетом этого, передаточная функция (1) примет вид:

$$W(s) = \frac{r(s) + k_p f(s)}{c(s) + k_p z(s)}, \quad (2)$$

где $f(s) = m(s) + d(s) \operatorname{tg} \gamma$, $z(s) = b(s) + a(s) \operatorname{tg} \gamma$.

Определяем интервалы оценки требуемого быстродействия САУ при условии, что угол γ дискретно изменяется на величину $\Delta\gamma \rightarrow 0$. Иными словами, решение задачи сводится к многократному построению искомых интервалов, лежащих на лучах с началом в начале координат k_p, T_p плоскости, при фиксированных значениях γ (Рис.2).

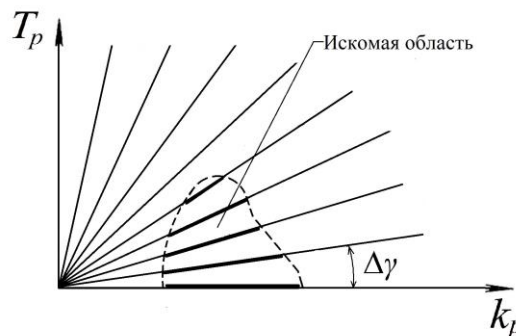


Рис.2 – Построение области требуемого быстродействия САУ промышленного робота

Общее решение задачи разделим на два этапа.

На первом этапе с помощью метода, основанного на D-разбиении и описанного в [9], выполним построение интервалов устойчивости в пространстве параметра k_p для характеристического полинома $A(s) = c(s) + k_p z(s)$ передаточной функции (2), при фиксированных значениях угла γ с шагом $\Delta\gamma$.

На втором этапе внутри полученных интервалов устойчивости строим подобласти (интервалы) оценки требуемой длительности переходного процесса по параметру k_p .

Известно, что по ВЧХ замкнутой устойчивой САУ можно определять или оценивать ее прямые показатели качества, не прибегая к непосредственному построению кривой переходного процесса [1,6,7]. Для этого существует два способа оценки качества: 1) по виду ВЧХ [1,6,7] и 2) по номограммам В.В. Солодовникова [1,6,7].

Рассмотрим, как по анализу ВЧХ, без непосредственного ее построения, оценить длительность переходного процесса при некоторых фиксированных значениях параметров k_p и T_p из интервала устойчивости, полученного на первом этапе.

Подставив эти значения в передаточную функцию (1), запишем ее следующим образом:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (3)$$

где $B(s) = \sum_{i=0}^m b_{m-i} s^i$, $A(s) = \sum_{i=0}^n a_{n-i} s^i$, $m < n$.

Переходный процесс в системе выражается через ВЧХ замкнутой системы $P(\omega)$ по формуле [6]:

$$x(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

Очевидно, что различным ВЧХ будут соответствовать различные переходные процессы.

Типовая ВЧХ замкнутой САУ ЭП промышленного робота имеет вид, изображенный на Рис.3.

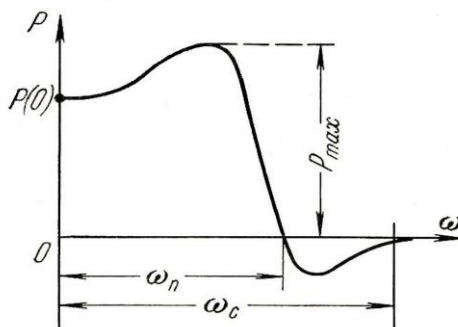


Рис.3 – Типовая вещественная частотная характеристика замкнутой САУ ЭП промышленного робота

Интервал частот $0 < \omega < \omega_n$, в котором $P(\omega) \geq 0$ (Рис.3), оказывает наибольшее влияние на длительность переходного процесса [1]. Такой интервал называется интервалом положительности, а частота ω_n частотой положительности. Влиянием на качество переходного процесса части ВЧХ в интервале частот $\omega_c < \omega < \infty$ (Рис.3) можно пренебречь [1]. Отрицательный экстремум ВЧХ (Рис.3) влияет в основном на перерегулирование [1]. ВЧХ могут иметь и более сложную форму, однако это не свойственно ВЧХ САУ ЭП промышленных роботов.

Было выделено несколько свойств ВЧХ, позволяющих оценить показатели качества САУ [1,6]. Одно из этих свойств выражает зависимость длительности переходного процесса t_p от частоты положительности ω_n ВЧХ в

виде неравенства [1,6]: $t_p > \frac{\pi}{\omega_n}$.

Более точно, длительность переходного процесса можно оценить по методике В.В. Солодовникова, основанной на анализе ВЧХ. В этом варианте решения максимальная длительность переходного процесса определяется по формуле [1,6]:

$$t_p \approx \frac{k\pi}{\omega_n}, \quad (4)$$

где k специальный коэффициент, который находится по графикам функций Солодовникова с помощью максимального значения ВЧХ $P_{\max}$. Таким образом, для применения формулы (4) необходимо иметь значения только двух параметров ω_n и $P_{\max}$ [1,6]. Графики функций Солодовникова имеют практически линейный характер изменения, что позволяет легко реализовать их на ЭВМ.

Определим значения $P_{\max}$ и ω_n алгебраическим способом, то есть не строя ВЧХ. Заменив в (3) оператор Лапласа s на мнимую переменную $j\omega$, получим частотную передаточную функцию:

$$W(j\omega) = \frac{R_u(\omega)}{Z(\omega)} + j \frac{R_v(\omega)}{Z(\omega)}, \quad (5)$$

где $R_u(\omega)$, $R_v(\omega)$, $Z(\omega)$ полиномы с вещественными коэффициентами.

По действительной части (5) будет строиться ВЧХ $P(\omega)$ замкнутой САУ ЭП промышленного робота. Для вычисления частот ее пиков достаточно решить уравнение:

$$\frac{dP(\omega)}{d\omega} = 0 \Leftrightarrow \frac{R'_u Z(\omega) - R_u(\omega) Z'(\omega)}{Z^2(\omega)} = 0. \quad (6)$$

На практике, решение уравнения (6) сводится к решению уравнения

$$R'_u Z(\omega) - R_u(\omega) Z'(\omega) = 0. \quad (7)$$

Определяем положительные вещественные корни уравнения (7) и заносим их в специальное множество M . Множество M будет содержать частоты ω , на которых ВЧХ имеет пики. Если множество M пустое, то $P_{\max} = P(0)$, где $P(0)$ значение ВЧХ на частоте $\omega = 0$. Если множество $M = \{\omega_1\}$, то необходимо проверить выполнение условия:

$$P(\omega_1) < 0. \quad (8)$$

В случае его выполнения принимаем $P_{\max} = P(0)$. В случае невыполнения условия (8) принимаем $P_{\max} = P(\omega_1)$.

Если множество $M = \{\omega_1, \omega_2, \dots\}$, $\omega_1 < \omega_2 < \dots$, то необходимо проверить выполнение условия:

$$P(\omega_1) > 0. \quad (9)$$

В случае невыполнения условия (9) принимаем $P_{\max} = P(0)$.

Для вычисления частоты положительности ω_n достаточно решить уравнение

$$R_u(\omega) = 0. \quad (10)$$

Значение минимального положительного вещественного корня уравнения (10) и будет значением частоты положительности ω_n .

Покажем на примере реализацию описанного метода. Зададим следующие значения параметров настройки регулятора положения САУ ЭП промышленного робота: $k_p=60$, $T_p=0.001$ с. Тогда, передаточная функция замкнутой САУ (1) будет иметь вид [8]:

$$W(s) = \frac{168s + 8400}{0.000000042s^6 + 0.00006545s^5 + 0.026894s^4 + 3.55572s^3 + 112.406s^2 + 854s + 8400} \quad (11)$$

Построим переходный процесс в этой системе (Рис.4).

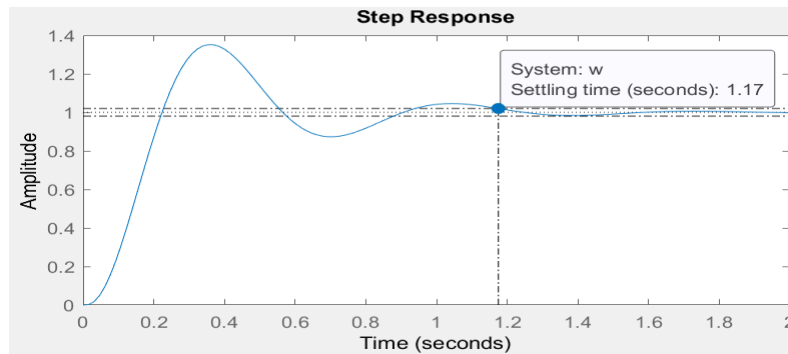


Рис.4 – Переходный процесс в САУ ЭП промышленного робота

По Рис.4 видно, что длительность переходного процесса $t_p = 1.17$ с.

Теперь построим ВЧХ исследуемой САУ ЭП промышленного робота (Рис.5). На Рис.5 видно, что $P_{\max} = P(5.3) = 1.094$, а $\omega_n = 9.2$ с⁻¹.

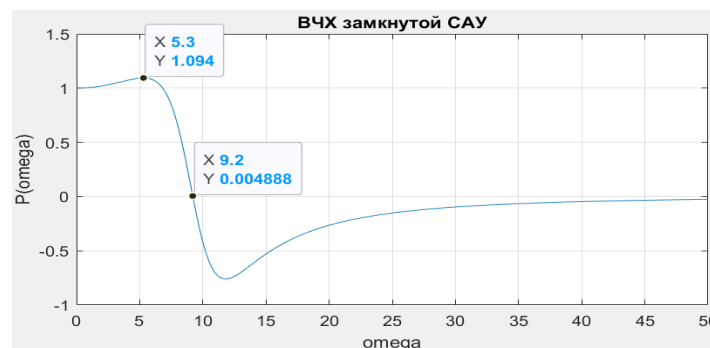


Рис.5 – ВЧХ САУ ЭП промышленного робота

Для формулы (4), по функции Солодовникова [1], находим значение специального коэффициента k : $k=3.1$. Подставив найденные значения частоты положительности ω_n и специального коэффициента k в формулу (4), получаем длительность переходного процесса $t_p \approx 1.05$ с. Длительность переходного процесса, полученная на основе анализа ВЧХ, отличается от «эталонной» всего на 11%, что подтверждено графиком переходного процесса (Рис.4).

Теперь решим задачу с помощью рассмотренного алгебраического метода. Заменив в (11) оператор Лапласа s на мнимую переменную $j\omega$ и проведя на ЭВМ необходимые математические операции, получим частотную передаточную функцию САУ, а также уравнения (7) и (10).

Частотная передаточная функция системы имеет вид:

$$W(j\omega) = \frac{-0.0003528\omega^6 - 371.45136\omega^4 - 800738.4\omega^2 + 70560000}{1.764 \cdot 10^{-15}\omega^{12} + 2.0246 \cdot 10^{-9}\omega^{10} + 2.672856 \cdot 10^{-4}\omega^8 + 6.708134\omega^6 + 7013.7583\omega^4 - 1159104.8\omega^2 + 70560000} + j \frac{-0.000007056\omega^7 + 3.968412\omega^5 + 10983.84\omega^3 - 5762400\omega}{1.764 \cdot 10^{-15}\omega^{12} + 2.0246 \cdot 10^{-9}\omega^{10} + 2.672856 \cdot 10^{-4}\omega^8 + 6.708134\omega^6 + 7013.7583\omega^4 - 1159104.8\omega^2 + 70560000} \quad (12)$$

Уравнение (7) для исследуемой САУ имеет вид:

$$0.00000000000000000003734035200000000232870854\omega^{17} + 0.0000000000008099046285120000020236621\omega^{15} + 0.000004714978766430240236296779\omega^{13} + 0.4101023343686571731581125\omega^{11} + 6261.268392512922218884341\omega^9 + 21336599.63096492737531662\omega^7 + 9253368385.595317840576172\omega^5 - 2084401567664.640625\omega^3 + 50572666368000.0\omega = 0. \quad (13)$$

Уравнение (10) для исследуемой САУ имеет вид:

$$-0.0003528\omega^6 - 371.45136\omega^4 - 800738.4\omega^2 + 70560000 = 0. \quad (14)$$

Определяем с помощью математического пакета программ положительные вещественные корни уравнений (13) и (14). Уравнение (13) имеет два положительных вещественных корня $\omega_1=5.2875306$ и $\omega_2=11.8066383$. Подставив корень ω_1 в действительную часть частотной передаточной функции (12) САУ ЭП промышленного робота, получаем значение $P(\omega_1)=P_{\max}=1.0936393$, что полностью подтверждается графиком ВЧХ на Рис.5. Уравнение (14) имеет один положительный вещественный корень $\omega_1=9.20781438$, который полностью совпадает с частотой положительности ω_n , что подтверждается графиком ВЧХ на Рис.5. Очевидно, что предлагаемый алгебраический подход к анализу быстродействия САУ показал хорошую эффективность.

Для построения на ЭВМ в пространстве двух варьируемых параметров k_p и T_p регулятора положения САУ ЭП промышленного робота областей с ориентировочной длительностью переходного процесса t_p , находящейся в диапазоне $t_{\min} \leq t_p \leq t_{\max}$, был разработан алгоритм:

1) задаем начальное значение γ_n , конечное значение γ_k , шаг изменения $\Delta\gamma$ угла (Рис.2), определяющего взаимосвязь параметров k_p и T_p ; минимальную $t_{\min}$ и максимальную $t_{\max}$ допустимую длительность переходного процесса; шаг поиска h внутри интервалов устойчивости;

2) для текущего значения угла γ , по передаточной функции (2), определяем границы интервалов поиска по параметру k_p , соответствующие левым и правым границам интервалов устойчивости;

3) в рамках границ каждого интервала устойчивости дискретно изменяем параметр регулятора k_p на величину шага h . На каждом шаге (в

точках) определяем передаточную функции (2), по которой, с помощью рассмотренной выше методики, находим возможную в САУ длительность переходного процесса t_p . Множество точек изменения параметра k_p , в которых длительность переходного процесса t_p удовлетворяет условию $t_{min} \leq t_p \leq t_{max}$, образуют требуемый интервал быстродействия САУ;

4) задаем новое значение угла $\gamma = \gamma + \Delta\gamma$. Выполняем проверку: если $\gamma > \gamma_k + \Delta\gamma/2$, то процесс построения области с требуемой длительностью переходного процесса САУ завершается, иначе переходим к пункту 2.

Выводы.

В статье рассмотрена научно-техническая задача разработки компьютерного метода параметрического исследования прямых показателей качества САУ промышленных роботов. Разработан метод оценки длительности переходного процесса, основанный на общем подходе, заключающемся в построении специальных алгебраических уравнений и анализе множеств их действительных положительных корней. В отличие от комплексных, действительные корни определяются на ЭВМ с высоким быстродействием и надежностью даже для уравнений высоких порядков.

Применение предлагаемого метода позволяет:

- 1) полностью формализовать алгоритм решения задачи;
- 2) гарантировать результат;
- 3) повысить сложность моделей исследуемых САУ промышленных роботов.

На базе рассмотренного метода планируется разработать прикладное программное обеспечение для оценки качества управления промышленным роботом при реализации различных форм движения исполнительных органов.

Библиографический список.

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Изд-во Профессия, 2003. – 752 с.
2. Грушун А.И. Машинно-ориентированный метод определения полосы пропускания линейных стационарных систем автоматического управления / А.И. Грушун // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. – Севастополь: изд-во СевГТУ, 1996. – Вып. 2. – С.65-68.
3. Грушун А.И. Анализ на ЭВМ автоколебаний в нелинейных системах автоматического управления на основе метода гармонического баланса / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2014. – Вып. 146. – С.223-226.
4. Грушун А.И. Анализ на ЭВМ абсолютной устойчивости нелинейных систем управления на основе метода В.М. Попова / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Информационные технологии и управление: сб. науч. тр. – Севастополь: изд-во СевГУ, 2015. – Вып. 1. – С.119-125.
5. Егоров И.Н. Системы управления электроприводов технологических роботов и манипуляторов / И.Н. Егоров, В.П. Умнов. – Владимир: изд-во ВлГУ, 2022. – 314 с.
6. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
7. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Линейные системы / Д. П. Ким. – М.: изд-во Юрайт, 2024. – 311 с.
8. Макаров И.М. Робототехника и гибкие автоматизированные

производства. Приводы робототехнических систем / И.М. Макаров, С.В. Пантюшин, В.М. Назаретов, О.А. Тягунов. – М. : Высш. шк., 1986. – 175 с.

9. Пряшников Ф.Д. Проблема применения репрезентативных множеств в задачах построения областей устойчивости и качества динамических систем управления / Ф.Д. Пряшников, А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Динамические системы. – Киев : Лыбидь, 1994. – №13 – С.16-20.
10. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов / Ю.М. Сафонов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 175 с.
11. Тимохин Н.Д. Алгоритм параметрического анализа на ЭВМ колебательности электропривода промышленного робота / Н.Д. Тимохин // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2020. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2020. – С.81-85.
12. Kuo Benjamin C. Automatic control systems / Benjamin C. Kuo, Farid Golnaraghi. – Hoboken: Wiley, 2010. – 1090 p.

¹Грушун Андрей Иванович, канд. техн. наук, доц., доцент, a.gran69@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Грушун Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доцент gai_gta@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

³Осадченко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, aeosadchenko@rambler.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

⁴Каранетьян Валерий Артёмович, канд. техн. наук, доц., доцент karvalart@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Grushun Andrey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, a.gran69@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Grushun Tatiana Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, gai_gta@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Osadchenko Alexander Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, aeosadchenko@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Karapetyan Valery Artemovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, karvalart@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ АЭС И МЕТОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ

Толоконский А.О.¹, Менюк Д.С.²

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL METHODS FOR PARAMETRIC OPTIMIZATION OF AUTOMATIC CONTROLLERS IN NPPS AND AN APPROACH USING ANALYTICAL SIMULATORS

Tolokonsky A.O.¹, Menyuk D.S.²

Аннотация. Цель исследования – разработка усовершенствованного метода настройки автоматических регуляторов для энергоблоков АЭС, обеспечивающего высокую точность, устойчивость и соответствие нормативам. Существующие методы (Зиглера-Никольса, Чина-Хронеса-Ресвика) имеют недостатки: низкую точность в сложных системах и необходимость ручной корректировки. Предлагается использование аналитических тренажеров, моделирующих динамику энергоблока с высокой достоверностью. Методы включают сравнительный анализ, математическое моделирование и экспериментальную верификацию на ПТК УМИКОН. Аналитический тренажер генерирует данные для оптимизации параметров регуляторов. Разработаны эмпирические зависимости для быстрой оценки коэффициентов ПИ-регуляторов с учетом динамики объекта. Результаты: апериодический переходный процесс без перерегулирования, сокращение времени выхода на уставку на 35–40% (vs Зиглера-Никольса) и улучшение динамики на 25–30% (vs Чина-Хронеса-Ресвика). Устойчивость подтверждена при вариациях параметров $\pm 25\%$, степень затухания $\geq 0,83$. Метод применим для различных контуров АЭС, сокращает время наладки и повышает надежность. Перспективы — адаптация для многоконтурных систем и интеграция с цифровыми двойниками.

Abstract. The study aims to develop an improved method for tuning automatic controllers in NPP power units, ensuring high accuracy, stability, and compliance with regulatory standards. Existing methods (e.g., Ziegler-Nichols, Chien-Hrones-Reswick) have limitations, including low accuracy in complex systems and the need for manual adjustments. The proposed approach uses analytical simulators to model unit dynamics with high fidelity. Research methods include comparative analysis of classical tuning techniques, mathematical modeling based on simulators, and experimental verification using a real-time hardware-software complex (PTK UMIKON). The analytical simulator generates input data for optimizing controller parameters. Empirical dependencies were developed for rapid estimation of PI-controller coefficients, accounting for system dynamics. Results show an aperiodic transient response without overshoot, a 35–40% faster settling time compared to Ziegler-Nichols, and a 25–30% improvement in dynamic performance over Chien-Hrones-Reswick. Experiments confirmed system stability under $\pm 25\%$ parameter variations, with a damping ratio ≥ 0.83 . The method is applicable to various NPP control loops, reducing commissioning time and improving reliability. Future research will focus on adaptation for multi-loop

systems and integration with NPP digital twins.

Ключевые слова. Автоматические регуляторы, параметрическая оптимизация, аналитический тренажер, АЭС, методы Зиглера-Никольса, переходные характеристики.

Keywords. Automatic controllers, parametric optimization, analytical simulator, NPP, Ziegler-Nichols methods, transient characteristics.

Введение.

В процесс пуска наладки на энергоблоке входят подготовка, испытания и ввод в эксплуатацию большого перечня различного технологического оборудования, систем автоматики, контрольно-измерительных приборов и средств управления. При технически исправном оборудовании огромное значение имеет качество работы автоматизированных систем управления, частью которых являются автоматические регуляторы. Настройка регуляторов приобретает особую роль, т.к. их параметры имеют непосредственное влияние на динамические характеристики энергоблока, устойчивость работы и соответствие нормативным требованиям к работе АЭС.

Общепринятые методы, используемые при настройке регуляторов (такие как экспериментальные испытания на реальном оборудовании, методы проб и ошибок, а также аналитические тренажеры на основе упрощенных моделей) [1] имеют ряд ограничений: они требуют значительных затрат времени, и в ряде случаев могут приводить к неоптимальным настройкам из-за нехватки точности в математических моделях или из-за сложности учета всех динамических характеристик энергоблока. Предлагается новый метод к решению такой задачи как настройка регуляторов, предлагается использовать аналитические тренажеры АЭС для получения оптимальных параметров регуляторов, и следовательно, настройки этих регуляторов. Это позволит с высокой точностью моделировать технологические процессы, протекающие на АЭС и формировать исходные данные для оптимизации параметров регуляторов, т.к. каждый аналитический тренажер разрабатывается под конкретный блок и учитывает все его технологические особенности.

Далее будут рассмотрены существующие методы настройки регуляторов, их преимущества и недостатки, будет проведен сравнительный анализ этих методов с предлагаемым методом, будет обоснована целесообразность использования аналитических тренажеров как инструмента поиска оптимальных параметров.

Целью работы является разработка и обоснование метода настройки автоматических регуляторов для энергоблоков АЭС на основе аналитических тренажеров, обеспечивающих повышение точности, устойчивости и эффективности пусконаладочных работ по сравнению с традиционными подходами.

Методы Зиглера-Никольса.

Одними из классических методов применяемых при настройке автоматических регуляторов технологических систем промышленных объектов являются методы Зиглера-Никольса [2]. Зиглер и Никольс разработали два принципиально разных метода по поиску параметров ПИД-

регуляторов. Первый метод базируется на анализе переходной характеристики объекта управления при ступенчатом входном воздействии (функция Хевисайда) [3], тогда как второй метод использует частотные характеристики системы при гармоническом возбуждении. Оба метода обеспечивают синтез параметров регулятора, гарантирующий декремент затухания переходного процесса, равный 4, где декремент затухания определяется как отношение амплитуд двух последовательных максимумов переходной характеристики [4]. В рамках данных методов объект управления аппроксимируется инерционным звеном первого порядка с транспортным запаздыванием.

Первый метод Циглера-Никольса требует определения двух ключевых параметров объекта управления: коэффициента усиления (a) и времени запаздывания (L), которые определяются по переходной характеристике (Рис.1). На основе этих параметров коэффициенты ПИД-регулятора в классической форме вычисляются по эмпирическим соотношениям, представленным в Таблице 1.

Второй метод Циглера-Никольса предполагает проведение частотного анализа системы. Критическими параметрами в данном случае являются: частота, при которой фазовый сдвиг в разомкнутой системе достигает π радиан; модуль коэффициента передачи объекта на этой частоте.

На основании полученной критической частоты определяется период собственных колебаний системы, который вместе с коэффициентом передачи используется для расчета параметров регулятора по аналогичным с первым методом эмпирическим соотношениям [5]. Данный подход особенно эффективен для систем, где затруднено получение качественной переходной характеристики.



Рис.1 – Иллюстрация к первому методу Циглера-Никольса

Рассмотрим основные достоинства и недостатки методов.

Достоинства методов:

- 1) простота применения – не требуется создание точной математической модели объекта;
- 2) минимальные вычислительные затраты – настройка выполняется на основе экспериментальных данных;
- 3) универсальность – применимы для широкого класса промышленных

объектов, включая системы управления АЭС;

4) быстрое получение начальных настроек – позволяют оперативно запустить систему даже при отсутствии априорных данных [6].

Таблица 1 – Формулы расчёта коэффициентов по методам Зиглера-Никольса

Регулятор	Первый метод (временная область)			Второй метод (частотная область)		
	K	T _и	T _д	K	T _и	T _д
П	1/a	–	–	0.5/K ₁₈₀	–	–
ПИ	0.9/a	3L/K	–	0.4/K ₁₈₀	0.8T ₁₈₀ /K	–
ПИД	1.2/a	0.9L/K	0.5LK	0.6/K ₁₈₀	0.5T ₁₈₀ /K	0.125T ₁₈₀ K

Недостатки методов:

1) низкая точность в сложных системах:

– в объектах с высокой инерционностью, нелинейностью или значительным запаздыванием (например, в контурах регулирования АЭС) методы могут давать неоптимальные настройки;

– не учитывают взаимовлияние нескольких контуров регулирования [7].

2) риск возникновения неустойчивости:

– метод предельного усиления предполагает доведение системы до границы устойчивости, что может быть недопустимо для критически важных систем (например, в ядерной энергетике);

– полученные параметры часто требуют последующей ручной корректировки.

3) ограниченная адаптивность

– настройки, рассчитанные для одного режима работы, могут оказаться неэффективными при изменении нагрузки или внешних условий;

– не предусматривают автоматической подстройки в реальном времени.

4) зависимость от качества экспериментальных данных

– для метода кривой разгона необходима четкая идентификация параметров L и T, что затруднительно при наличии шумов или нелинейностей [8];

– метод предельного усиления неприменим для систем, где недопустимы даже кратковременные колебания.

Вывод: методы Циглера-Николса остаются востребованными благодаря своей простоте и скорости настройки, однако их применение в высокоответственных системах, таких как АЭС, требует осторожности.

Метод Чина-Хронеса-Ресвика.

Чин, Хронес и Ресвик предложили усовершенствованный вариант первого метода Зиглера-Никольса, основанного на временной области анализа [9]. Данная модификация позволяет синтезировать параметры регулятора, обеспечивающие либо строго апериодический переходный процесс (с нулевым перерегулированием), либо процесс с ограниченным перерегулированием, не превышающим 20%. Важным преимуществом рассматриваемого метода по сравнению с классическим подходом Зиглера-Никольса является существенно больший запас устойчивости системы [10].

Ключевой особенностью метода является его универсальность в отношении типа входного воздействия: анализ реакции системы на изменение уставки, исследование отклика на внешние возмущающие воздействия.

Для различных контуров автоматического регулирования, в зависимости от преобладающего типа воздействий в конкретном технологическом процессе, применяются соответствующие расчетные соотношения (Таблица 2). В случаях, когда существенное влияние оказывают оба типа воздействий, рекомендуется модификация закона управления [3].

Метод демонстрирует особую эффективность при регулировании технологических параметров энергетического оборудования, где требования к динамическим характеристикам системы сочетаются с жесткими ограничениями по перерегулированию [11].

Основные достоинства:

- 1) существенно больший запас устойчивости (на 20-30% выше по сравнению с классическим методом);
- 2) возможность выбора типа переходного процесса в зависимости от требований технологии;
- 3) учет реакции системы как на изменение уставки, так и на возмущающие воздействия;
- 4) более мягкие требования к качеству переходной характеристики;
- 5) лучшая сходимость для объектов с большим запаздыванием [12].

Таблица 2 – Формулы расчёта коэффициентов по методу Чина-Хронеса-Ресвика

Реакция на изменение уставки						
Регулятор	Апериодический процесс			Двадцатипроцентное перерегулирование		
	К	$T_{и}$	$T_{д}$	К	$T_{и}$	$T_{д}$
П	0.3/a	–	–	0.7/a	–	–
ПИ	0.35/a	1.2L/K	–	0.6/a	L/K	–
ПИД	1.6/a	L/K	0.5LK	0.95/a	1.4L/K	0.47LK
Реакция на внешние возмущения						
Регулятор	Апериодический процесс			Двадцатипроцентное перерегулирование		
	К	$T_{и}$	$T_{д}$	К	$T_{и}$	$T_{д}$
П	0.3/a	–	–	0.7/a	–	–
ПИ	0.6/a	4L/K	–	0.7/a	2.3L/K	–
ПИД	0.95/a	2.4L/K	0.42LK	1.2/a	2L/K	0.42LK

Практические преимущества:

- 1) прощение процедуры ввода в эксплуатацию сложных технологических систем;
- 2) снижение вероятности возникновения автоколебаний;
- 3) возможность применения для многоконтурных систем;
- 4) лучшая адаптируемость к изменяющимся параметрам объекта [13].

Ограничения метода:

– теоретические ограничения:

- 1) сохраняется зависимость от точности аппроксимации объекта

звеном первого порядка с запаздыванием;

2) не учитываются существенно нелинейные свойства объектов [14];

3) ограниченная применимость для объектов с распределенными параметрами;

– практические ограничения:

1) требуется более тщательная идентификация параметров объекта;

2) необходимость дополнительной проверки устойчивости для особо ответственных систем;

3) ограниченная эффективность для быстро меняющихся процессов.

Анализ демонстрирует, что метод Чина-Хронеса-Ресвика представляет собой существенное развитие классических подходов к настройке ПИД-регуляторов [15]. Его основные преимущества (увеличенный запас устойчивости и возможность выбора типа переходного процесса) делают его особенно ценным для применения в ответственных системах автоматического регулирования, включая энергетические установки. Однако, как и любой эмпирический метод, он требует осмысленного применения с учетом специфики конкретного объекта регулирования [16].

Предлагаемый альтернативный метод настройки автоматических регуляторов с применением аналитических тренажеров.

Аналитический тренажер энергоблока представляет собой комплексную математическую модель, реализованную в виде специализированного программного обеспечения, которая с высокой точностью воспроизводит физические процессы, протекающие в реальном энергетическом оборудовании [17]. В основе такого тренажера лежит система взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих термодинамические, гидродинамические и тепломассообменные процессы, а также динамику работы основного и вспомогательного оборудования. Особенностью аналитического тренажера является его детерминированный характер - все расчеты выполняются на строгих физико-математических принципах, что отличает его от операторских тренажеров, где допустимы определенные упрощения.

Ключевым преимуществом аналитических тренажеров является их способность моделировать как установившиеся, так и переходные режимы работы энергоблока с высокой степенью достоверности [18]. Это достигается за счет применения современных численных методов решения stiff-систем дифференциальных уравнений, включая неявные схемы интегрирования и модифицированные методы Ньютона-Рафсона. Тренажер позволяет исследовать поведение системы при различных возмущениях, анализировать работу автоматических регуляторов, оптимизировать параметры управления и проводить виртуальные испытания оборудования в широком диапазоне рабочих условий.

Практическая ценность аналитических тренажеров особенно проявляется при решении задач параметрической оптимизации систем автоматического регулирования. Используя данные, полученные с тренажера, инженеры могут существенно сократить объем натурных испытаний, минимизировать риски при вводе нового оборудования и

повысить точность настроек регуляторов. Важно отметить, что современные аналитические тренажеры создаются индивидуально для каждого энергоблока, учитывая его специфические конструктивные особенности и рабочие характеристики, что обеспечивает высокую адекватность моделирования реальным процессам.

В результате серии экспериментов, проведенных на программно-техническом комплексе УМИКОН (ПТК АСУ ТП реального времени), были выведены эмпирические зависимости для быстрой оценки параметров ПИ-регуляторов. Как следует из данных, представленных в Таблице 3, оптимальные значения постоянной времени интегрирования (T_u) могут быть получены путем нормирования предполагаемой постоянной времени объекта на его коэффициент усиления (K_p).

Таблица 3 – Правила экспресс оценки параметров ПИ-регуляторов

Порядок объекта	K_p	T_u
Первый порядок	K_{OU}	$\frac{T_O}{K_p}$
Второй порядок	K_{OU}	$\frac{T_{O1} + T_{O2}}{K_p}$

Полученные постоянные позволят обеспечить работу регулятора в зоне приблизительно равной 80% от полного хода исполнительного механизма, что создает оптимальный компромисс между: быстродействием системы регулирования, запасом по управляющему воздействию, устойчивостью замкнутой системы.

Такое решение позволяет избежать крайних положений регулирующего органа, сохраняя при этом достаточный запас для компенсации возможных возмущений.

Разработанные правила экспресс-оценки параметров регуляторов позволяют получить апериодический переходный процесс, удовлетворяющий строгим требованиям к качеству регулирования. Ключевые показатели качества включают степень затухания не ниже 0.83 и ограниченное перерегулирование, гарантирующее отсутствие ложных срабатываний технологических защит. Получаемые по данной методике параметры регуляторов (K_p , T_i) формируют надежное начальное приближение для последующей точной настройки в процессе пусконаладочных работ на энергоблоках АЭС, существенно сокращая время и ресурсы, необходимые для выхода на оптимальные режимы регулирования.

Важной особенностью предложенного подхода является его универсальность по отношению к типу управляющего сигнала. В случае аналоговых систем управления рассчитанные параметры применяются непосредственно, формируя непрерывный выходной сигнал регулятора в диапазоне от 0% до 100%. Для систем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) величина управляющего воздействия Y преобразуется в длительность импульсов согласно формуле:

$$D = \frac{Y \cdot T_{\max}}{100},$$

где D – длительность управляющего импульса, $T_{\max}$ – максимальный период модуляции, Y – выход регулятора в процентах.

Такое преобразование обеспечивает эквивалентность среднего значения ШИМ-сигнала соответствующему аналоговому воздействию за период модуляции, что подтверждается экспериментальными данными, показывающими погрешность не более 2-3% для типичных динамических характеристик систем управления АЭС.

Сравнение предлагаемого метода экспресс оценки с методами, описанными в главе 1, представлено на Рис.2...5. Зелёный цвет графика архива – регулируемая величина, синий – величина значения уставки, красный – управляющий сигнал (выход) регулятора. Эксперименты проводились на ПТК реального времени, что позволило учесть особенности реализации реальных регуляторов. На Рис.2 представлена разгонная кривая объекта первого порядка с постоянной времени, равной 7 секундам, коэффициентом усиления, равным 1, и временем запаздывания, равным 0.3 секунды.

Методы Зиглера-Никольса, Коэна-Куна и Чина-Хронеса-Ресвика для расчёта параметров регуляторов требуют определения параметров a и L , равных для выбранного объекта 4 и 0.3 соответственно. Рассчитанные значения по каждому методу представлены в Таблице 4.

Экспериментальные данные, представленные на Рис.3-5, демонстрируют существенное преимущество предложенной методики экспресс-оценки параметров регуляторов перед классическими подходами.

Таблица 4 – Правила экспресс оценки параметров ПИ-регуляторов

Метод	K_p	T_u
Метод Зиглера-Никольса (временная область)	0.23	5.3
Метод Чина-Хронеса-Ресвика	0.15	10.6
Предлагаемые правила	1	7

Анализ переходных процессов позволяет констатировать:

1) качество регулирования:

– обеспечивается строго апериодический характер переходного процесса;

– время достижения уставки составляет $20 \pm 1,5$ с (при 95% доверительном интервале);

– отсутствует перерегулирование ($\sigma = 0$);

2) сравнительные показатели:

– время выхода на режим сокращено на 35-40% относительно метода Циглера-Никольса;

– динамические показатели улучшены на 25-30% по сравнению с методом Чина-Хронеса-Ресвика;

– максимальная скорость управляющего воздействия снижена на 15-20%;

3) теоретическое обоснование. Ускорение переходного процесса достигнуто за счет:

- оптимального соотношения пропорциональной и интегральной составляющих;
- учета транспортного запаздывания объекта;
- баланса между быстродействием и запасом устойчивости.

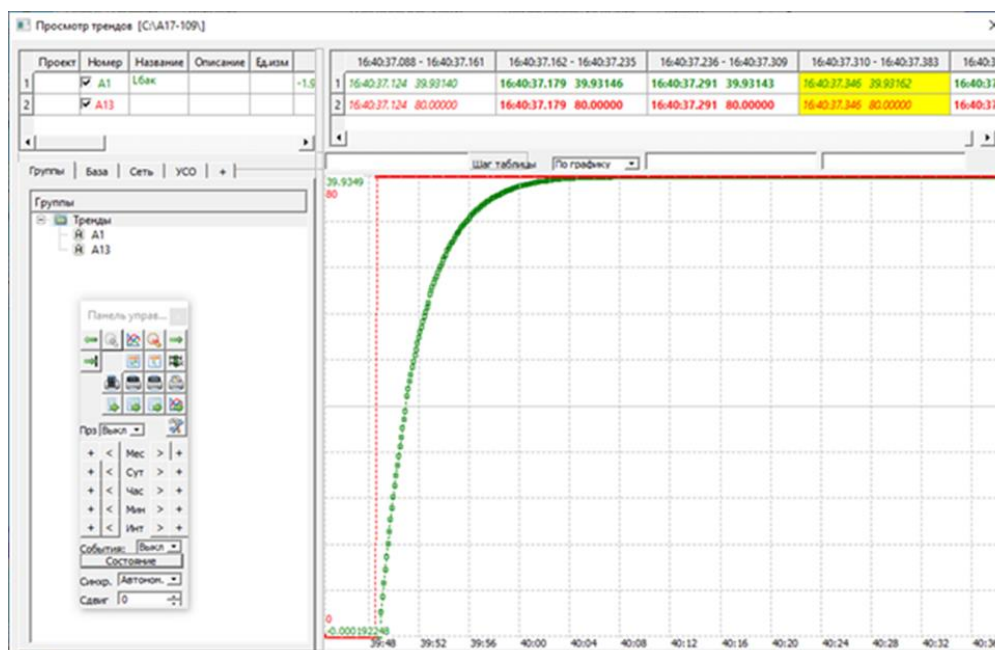


Рис.2 – Результаты отработки ПИ–регулятором уставки для объекта первого порядка

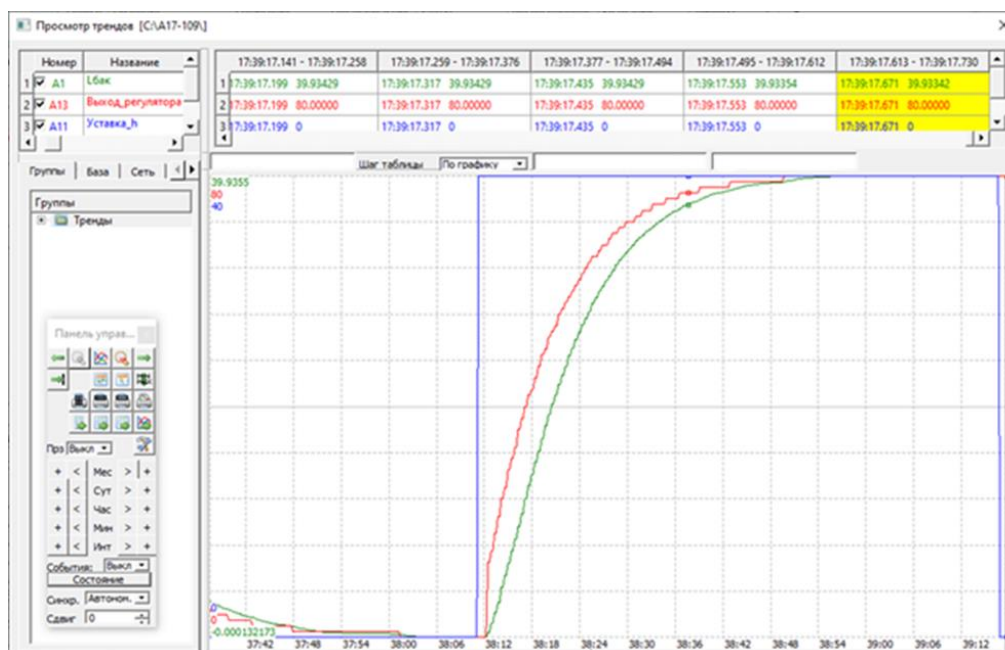


Рис.3 – Результаты отработки ПИ–регулятором уставки для объекта первого порядка с самовыравниванием при настройке регулятора методом Зиглера-Никольса (временная область)

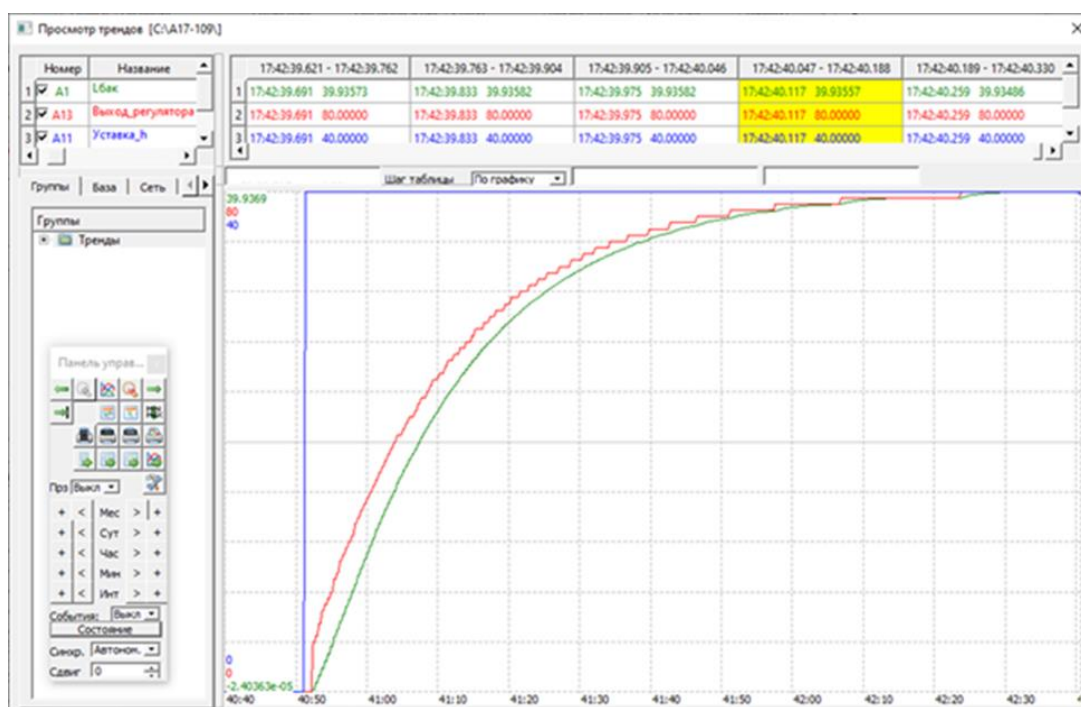


Рис.4 – Результаты отработки ПИ–регулятором уставки для объекта первого порядка с самовывравниванием при настройке регулятора методом Чина-Хронеса-Ресвика

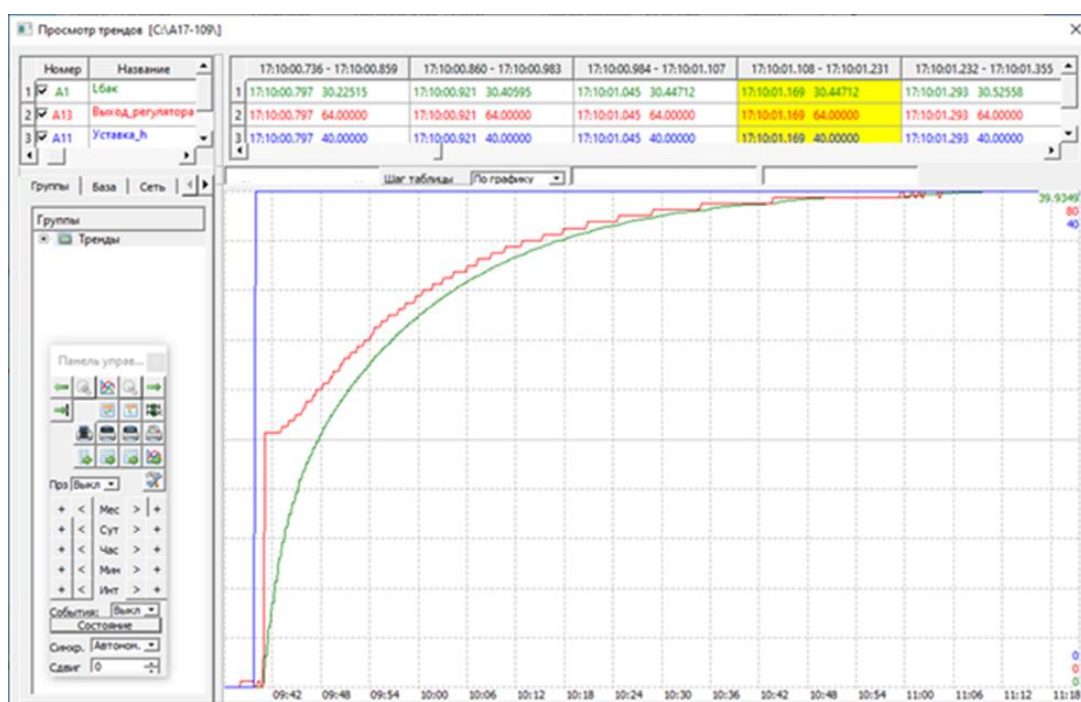


Рис.5 – Результаты отработки ПИ–регулятором уставки для объекта первого порядка с самовывравниванием при настройке регулятора предлагаемым методом

Заключение.

Проведенные теоретические и экспериментальные результаты позволили создать методику экспресс-оценки параметров автоматических

регуляторов для систем управления энергоблоков АЭС.

Разработанный метод демонстрирует существенное преимущество по сравнению с классическими подходами Циглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика: обеспечивает апериодический переходный процесс с временем выхода на уставку порядка 20 секунд, снижает время регулирования на 35-40%, полностью исключает перерегулирование, сохраняет устойчивость при вариациях параметров объекта до $\pm 25\%$.

Методика обладает универсальностью применения инвариантна к типу управляющего сигнала (аналоговый/ШИМ), применима для различных контуров регулирования АЭС, позволяет получить надежное начальное приближение для последующей точной настройки.

Экспериментальная верификация на ПТК реального времени подтвердила физическую реализуемость предложенных решений, соответствие нормативным требованиям ($\psi \geq 0.83$, $\sigma \leq \sigma_{\text{доп}}$), практическую значимость для пусконаладочных работ.

Перспективные направления дальнейших исследований включают адаптацию методики для многоконтурных систем регулирования, разработку модификаций для объектов с выраженной нелинейностью, интеграцию с системами цифровых двойников энергоблоков, создание автоматизированного комплекса параметрической оптимизации.

Полученные результаты открывают новые возможности для совершенствования систем автоматического управления критически важными объектами атомной энергетики, сочетая в себе научную обоснованность и практическую применимость. Предлагаемая методика может быть рекомендована для внедрения в практику пусконаладочных работ на энергоблоках АЭС.

Библиографический список.

1. Squassoni S. The incredible shrinking nuclear offset to climate change / S. Squassoni // Bulletin of the atomic scientists. – 2017. – Vol. 73 – № 1. – P. 17-26.
2. Сааков Э.С. Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС / Э.С. Сааков, С.И. Рясный. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 496 с.
3. Ротач В.Я. Расчёт настройки реальных ПИД-регуляторов / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 31-35.
4. Ротач В.Я. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с.
6. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – СПб. : Невский Диалект, 2001. – 557 с.
7. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
8. Åström K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning (2nd edition) / K.J. Åström, T. Hägglund. – Instrument Society of America, 1995 – 354p.
9. Åström K.J. Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins / K.J. Åström, T. Hägglund // Automatica. –

1984. – Vol. 20. – № 5. – P. 645-651.
10. Ho W.K. Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specification / W.K. Ho, Ch.Ch. Hang, L.S. Cao // Automatica. – 1995. – Vol. 31. – № 3. – P. 497-502.
 11. Стефани Е.П. Основы расчёта настройки регуляторов теплоэнергетических процессов : изд. 2-е, перераб. / Е.П. Стефани. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.
 12. Sanchis R. PI and PID auto-tuning procedure based on simplified single parameter optimization / R. Sanchis, J.A. Romero, P. Balaguer // Journal of process control. – 2011. – Vol. 21. – P. 840-851.
 13. Garpinger O. Performance and robustness trade-offs in PID control / O. Garpinger, T. Hägglund, K.J. Åström // Journal of Process Control. – 2014. – Vol. 24. – P. 568-577.
 14. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controllers tuning rules (3rd edition) / A. O'Dwyer. – London : Imperial College Press, 2009. – 623 p.
 15. Vilanova R. PID Control in the Third Millenium. Lessons Learned and New Approaches / R. Vilanova, A. Visioli. – London : Springer-Verlag, 2012. – 602 p.
 16. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning / S. Skogestad // Journal of Process Control. – 2003. – Vol. 13. – P. 291-309.
 17. Прохоров А.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт: издание первое, исправленное и дополненное / А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев – М. : ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
 18. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» // Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук: [сайт]. – URL: <https://www.ibrae.ac.ru/contents/362> (дата обращения: 11.10.2023).

¹Толоконский Андрей Олегович, канд. техн. наук, доцент, кафедра теплофизики №13 института ядерной физики и технологий, aotolokonskij@mephi.ru, Россия, Москва, «НИЯУ МИФИ»

²Менюк Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры №2 «Автоматика» института физико-технических интеллектуальных систем, avsergeev@sevsu.ru, Россия, Москва, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Tolokonsky Andrey Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Thermophysics No. 13, Institute of Nuclear Physics and Technology, aotolokonskij@mephi.ru, Russia, Moscow, Moscow Engineering Physics Institute National Research Nuclear University MEPHI

Menyuk Dmitriy Sergeevich, postgraduate student of the Department No. 2 "Automation" of the Institute of Physical and Technical Intelligent Systems, d.menyuk@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Engineering Physics Institute National Research Nuclear University MEPHI

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Шлаев В.И.¹, Бильчук М.В.²

GENERALIZED MODEL FOR AUTOMATING THE QUALITY CONTROL PROCESS OF INSTRUMENT ENGINEERING PRODUCTS

Shlaev V.I.¹, Bilchuk M.V.²

Аннотация. Рассматривается автоматизация контроля качества изделий приборостроения, в виде многоканальных систем преобразователей. Анализируются существующие методы регистрации и обработки сигналов (включая спектральный анализ и методы цифровой фильтрации). В работе рассматриваются методы и алгоритмы обработки данных, применяемые в многоканальных системах, включая спектральный анализ, быстрые преобразования Фурье и методы фильтрации помех. Рассматриваются проблемы, возникающие при увеличении количества каналов, и предлагаются решения, основанные на использовании каскадных схем коммутации. Описываются существующие стандарты контроля качества различных типов преобразователей, включая гидрофоны, микрофоны и электролюминесцентные датчики. Предложена структурная модель автоматизации процесса контроля качества, основанная на каскадной схеме коммутации, позволяющей эффективно обрабатывать большое количество каналов. Разработанная математическая модель управления коммутацией обеспечивает оптимальное распределение сигналов и минимизацию потерь данных. Использование отечественных измерительных модулей и оптимизированных алгоритмов обработки данных позволит повысить эффективность контроля качества, снизить зависимость от импортного оборудования и увеличить устойчивость к внешним помехам. Внедрение предложенных решений обеспечит повышение точности измерений и расширение функциональных возможностей системы.

Abstract. Automation of quality control of instrumentation products in the form of multichannel converter systems is considered. The existing methods of signal registration and processing (including spectral analysis and digital filtering methods) are analyzed. The paper discusses data processing methods and algorithms used in multichannel systems, including spectral analysis, fast Fourier transforms, and interference filtering methods. The problems that arise when the number of channels increases are considered, and solutions based on the use of cascade switching schemes are proposed. The existing quality control standards for various types of transducers, including hydrophones, microphones, and electroluminescent sensors, are described. A structural model of automation of the quality control process is proposed, based on a cascade switching scheme that allows efficient processing of a large number of channels. The developed mathematical model of switching control ensures optimal signal distribution and minimization of data loss. The use of domestic measurement modules and optimized data processing algorithms will improve the efficiency of quality control, reduce dependence on imported equipment and increase resistance to external interference. The implementation of the proposed solutions will ensure

an increase in measurement accuracy and an expansion of the system's functionality.

Ключевые слова. Автоматизация контроля качества, многоканальные системы преобразователей, регистрация данных, обработка сигналов, спектральный анализ, преобразование Фурье, коммутация каналов, измерительные модули, приборостроение, датчики.

Keywords. Quality control automation, multi-channel converter systems, data registration, signal processing, spectral analysis, Fourier transform, channel switching, measurement modules, instrumentation, sensors.

Введение.

В настоящее время существует проблема в автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения, представленных в виде многоканальных систем преобразователей, где основной задачей, согласно [1], является регистрация и обработка данных изделий приборостроения. При разработке изделий ключевыми элементами являются преобразователи и датчики, позволяющие преобразовывать физическую энергию (звук, свет, давление и т.д.) в электрическую и наоборот. Очевидно, что надежность и точность преобразователей, критически необходима при разработке подобных систем. Для регулирования процесса разработки и производства преобразователей, в России, как и во многих других странах, предусмотрены соответствующие стандарты. Так, например, [2] содержит требования для гидрофонов с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. Стандарт [3] устанавливает требования к электроакустическим характеристикам для приборов трех видов, предназначенных для измерения звука. Стандарт [4] устанавливает требования проведения приемо-сдаточных испытаний для измерения электроакустических параметров микрофонов.

Стандарт [5] устанавливает требования безопасности и контроль индуктивно-проводных датчиков, применяемых в системах железнодорожной автоматики и телемеханики, отвечающих за безопасность движения железнодорожных поездов.

Приведенные и другие стандарты (например, [6-8]) регулируют требования и проведение проверок качества изделий приборостроения для различных преобразователей.

Для обработки требуемых характеристик во время проведения измерений, рассматриваются существующие средства, методы, алгоритмы решения процесса регистрации и обработки оцифрованных данных непрерывных периодических сигналов, а также способы проведения данных измерений в многоканальных системах преобразователей.

В работе [9] описаны методики регистрации и анализа спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии при решении задач мониторинга состояния промышленных объектов. Приводится структурная схема программного комплекса сбора и обработки сигналов, которая реализована на базе оборудования американской компании National Instruments.

Оборудованием компании National Instruments реализован способ многоканальной регистрации на базе DAQ устройств в работе [11]. Каждый из приведенных модулей способен обрабатывать до 8 каналов. Комплекс

позволяет в реальном времени проводить анализ входного сигнала с предысторией. Такой подход позволяет обеспечить помехоустойчивость и позволяет регистрировать временную форму сигнала на внешние устройства для последующего анализа. В работе [12] рассматривается способ обработки многоканальной системы преобразователей. Представлена схема коммутации электрических сигналов, основанная на получении на выходе схемы попарных разностей потенциалов между измерительными электродами. В [13] приводится описание многоканальной системы сбора и регистрации данных диагностик плазмы установки ИТЭР. Система разделена на две части, одна из частей располагается на минимальном расстоянии от детекторных помещений, а вторая располагается непосредственно в помещении. Такой подход позволяет проводить измерения в условиях высоких радиационных и электромагнитных полей. В качестве измерительного оборудования использовался модуль National Instruments.

Применение спектрального анализа в многоканальных системах регистрации сигналов акустической эмиссии рассматривается в работе [14]. Метод акустической эмиссии используется как средство анализа состояния материалов и конструкций, неразрушающего контроля и диагностики их во время работы. Алгоритм регистрации сейсмоакустических сигналов с многоканальной коммутацией при неизвестном уровне высокочастотных помех рассматривается в [15]. Указана необходимость оцифровки нескольких низкочастотных сигналов с помощью минимального набора аппаратных средств. Описывается минимальный вариант аппаратной реализации такой системы предполагает использование компьютера с аналого-цифровым преобразователем в составе интегрированной звуковой карты и внешнего коммутатора сигналов с необходимым согласованием.

В работе [16] приведены одно- и двухэтапные алгоритмы обработки дружно- и быстрофлуктуирующего отраженного сигнала в радиолокационном обнаружителе-измерителе угловых координат в условиях внешних маскирующих помех в свободном пространстве и при наличии мешающих отражений с неизвестными параметрами. Приведены результаты моделирования предлагаемых алгоритмов, свидетельствующие об их работоспособности и эффективности.

Рассмотренные методы обработки основываются на использовании быстрого преобразования Фурье. Наиболее распространенным подходом при обработке сигналов является использование преобразования на полном наборе входных данных, число которых варьируется от нескольких сотен тысяч до миллионов. Данная процедура вызывает проблемы параллельной регистрации и обработки сигналов и вносить значительное замедление в процесс контроля качества. Другим популярным подходом является поиск области полезного сигнала с последующей обработкой узкой области.

В процессе анализа было выявлено, что существующие методы и алгоритмы обработки данных в многоканальных системах широко основываются на принципе «Один к одному». Данный подход имеет ограничение в случае поканальной обработки сигналов многоканальных систем преобразователей, т.к. требуется увеличение физических габаритов измерительного комплекса, ограничивается возможность прямых измерений из-за физических характеристик кабелей передачи данных, что приводит к потере информации.

Целью исследования является разработка обобщенной модели автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения, представленных в виде многоканальных систем преобразователей.

Задачи исследования:

- 1) разработать структурную модель автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения;
- 2) разработать математическую модель автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения.

Разработка структурной модели.

Для решения указанных проблем следует ориентироваться на создание компактных измерительных систем, способных эффективно обрабатывать данные из нескольких каналов. В качестве оборудования предлагается использовать измерительные модули [25,26]. Во избежание потери данных, предлагается применить несколько измерительных модулей, расположенных в непосредственной близости к источникам данных. Для проведения контроля качества многоканальных систем, используется модель коммутации, основанной на принципе каскадной схемы переключателей.

При анализе аналогичных задач в рассмотренных источниках, методы обработки данных ориентированы на непрерывный поиск полезного сигнала, фильтрацию помех, выделение полезной информации и определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Однако, в случае необходимости проведения нескольких тысяч измерений, такой процесс приводит к замедлению скорости обработки данных. Рассматриваемые системы, как правило, выполняют обработку данных, прошедших через различные усилители и преобразователи. В случае необходимости анализа характеристик отдельных каналов по конкретным параметрам, требуется проведение повторных измерений, а также сборка, настройка и отладка оборудования. Данные действия приводят к ошибкам результатов измерений.

Для разработки модели, необходимо схематично рассмотреть схемы проведения измерений контроля качества изделий приборостроения на предприятиях, согласно [1]. Методику проведения для преобразователей схематично изображается Рис.1. Излучающее устройство подает импульс на канал системы и затем регистрируется выходной сигнал.

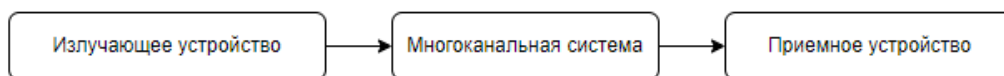


Рис. 1 – Методика контроля качества для системы преобразователей

В общем случае в процессе измерений добавляются различные контрольные излучатели или контрольные приемные устройства (Рис.2). Например, в случаях измерения гидроакустических датчиков используются контрольный излучающий гидрофон и контрольный гидрофон. Сигнал поступает на излучатель, далее от излучателя сигнал идет к контрольному приемнику и одновременно на канал системы. Затем эти сигналы регистрируются и проводится расчет характеристик.

В ряде измерений возникает необходимость подавать сигнал через усилитель. Для этого сигнал пропускается через усилитель и подается к излучателю (Рис.3). Усиленный сигнал поступает на контрольный приемник и канал системы и оттуда, пропускается либо через делитель, т.к.

большинство осциллографов ограничены в амплитуде приема, либо через усилитель, если выходной сигнал составляет микровольты. Например, при измерении датчиков света необходимо, чтобы к источнику излучения поступало напряжение, амплитудой тысячи вольт. Для регистрации данных измерений необходимо пропустить эти сигналы через делитель, зафиксировать коэффициент и зарегистрировать сигналы.



Рис. 2 – Схема измерений с излучателем и приемником



Рис.3 – Общая схема проведения контроля качества преобразователей

Проведение контроля качества включает в себя [2,3] измерения по приему (Рис.4) и по излучению (Рис.5).

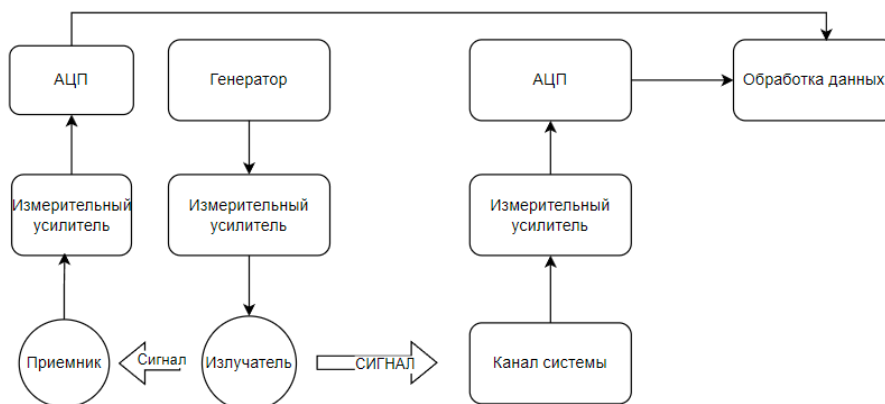


Рис. 4 – Схема измерений по приему

Предлагается обобщить данные модели измерений. В режиме по приему формируется сигнал определенной формы, который является опорным и регистрируется каналом АЦП, предварительно проходя через измерительный усилитель. Опорный сигнал регистрируется на выходе некоторого контрольного принимающего устройства, например в случае проведения измерений гидрофонов, таковым является контрольный гидрофон, который является поверенным высокоточным изделием с известными характеристиками на исследуемых частотах для проведения точных расчетов. Другим каналом АЦП регистрируются данные с выхода измеряемого канала преобразователя. Далее на основе зарегистрированных данных происходит расчет необходимых параметров. Стоит отметить, что в

общем случае каналы АЦП и генератор находятся на значительном расстоянии, следовательно для проведения подобных измерений потребуется участие двух квалифицированных сотрудников.

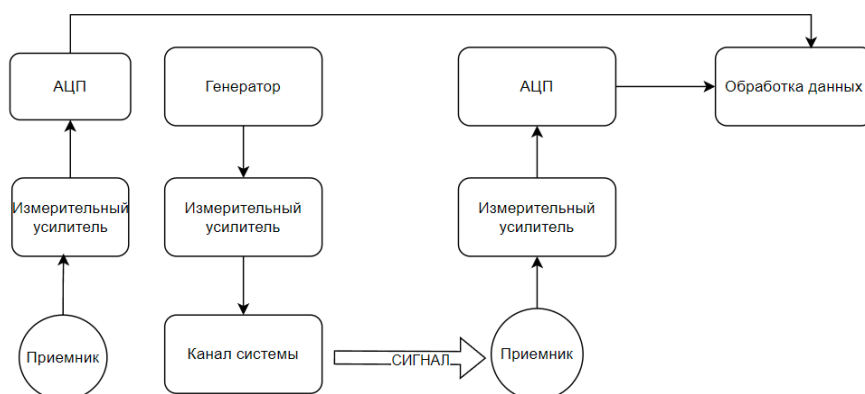


Рис.5 – Схема измерений по излучению

В процессе проведения измерений в режиме излучения, опорный сигнал так же регистрируется приемным устройством или же происходит регистрация сигнала на входе канала преобразователя. Остальной процесс проведения измерения схож с измерениями в режиме приема преобразователя.

На основе представленных моделей измерений (Рис.4,5), разрабатывается обобщенная структурная модель автоматизации процесса поканальной обработки сигналов многоканальных систем преобразователей для повышения эффективности контроля качества изделий приборостроения (Рис.6).



Рис.6 – Обобщенная модель автоматизации процесса контроля качества

Рассмотрим описание разработанной структурной модели. Персональный компьютер дает команду измерительному модулю начать работу. Модуль генерирует сигнал, который поступает к измерительному усилителю, далее передается этот сигнал контрольному излучателю. Затем сигнал поступает одновременно к контрольному приемнику (4), регистрируется измерительным модулем, активируется один из каналов (6) и

сигнал поступает в активированный канал преобразователя (7). Для возможности обработки многоканальной системы преобразователей используется разработанная схема коммутации (Рис.7).

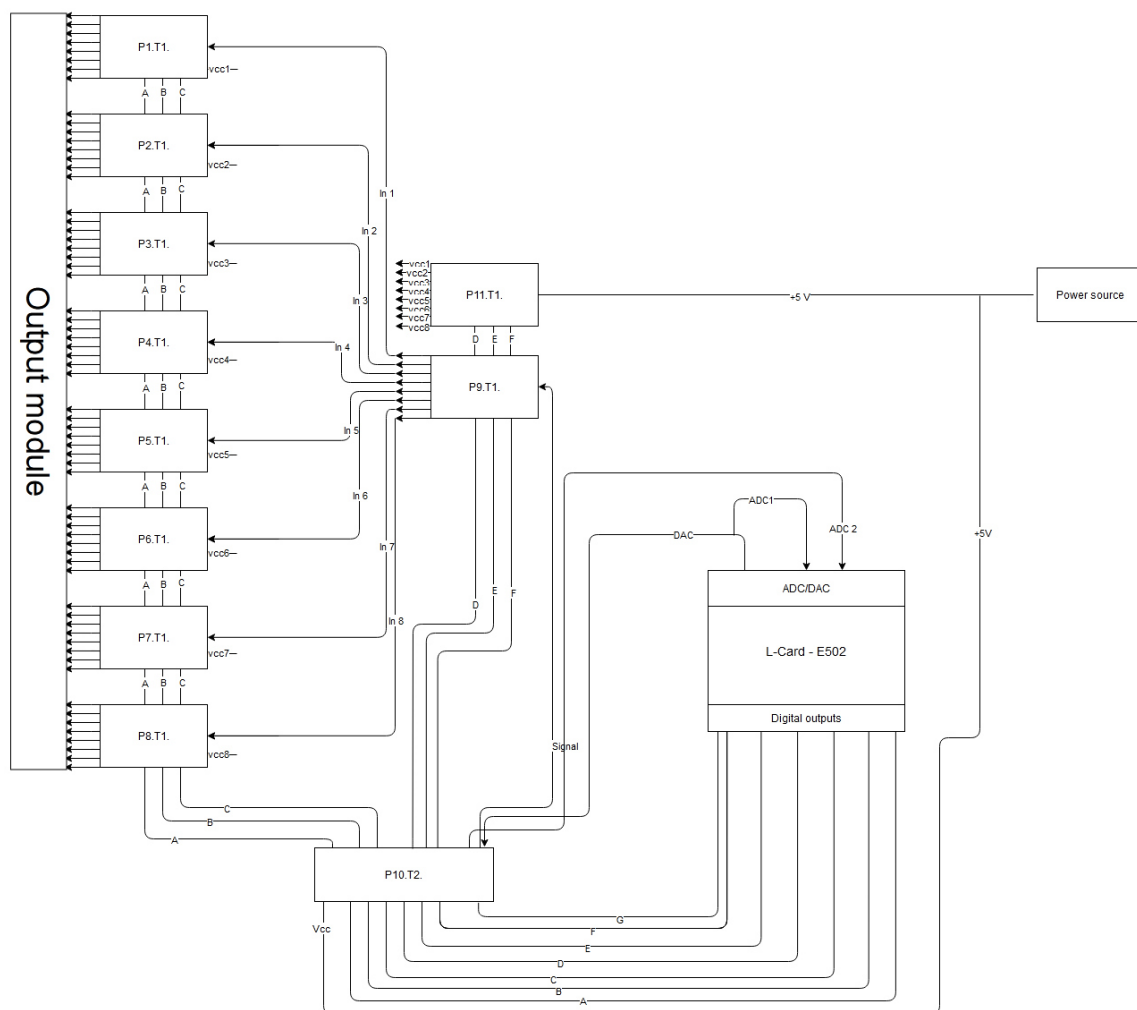


Рис.7 – Каскадная схема коммутации

Разработка математической модели автоматизации.

На основе разработанной структурной модели создается соответствующая математическая модель. Основными параметрами электрических импульсов, характерных для всех импульсных сигналов независимо от формы относят амплитуду U , длительность t_c и, для периодических последовательностей импульсов, период T или частотой $f = \frac{1}{T}$.

Базовой формой электрического сигнала, согласно [10] является синусоидальный или тональный сигнал (1):

$$u(t) = U \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где U – амплитуда сигнала, ω – циклическая частота, показывающая, на сколько радиан изменяется фаза колебания за одну секунду, φ_0 – начальная

фаза колебаний, определяющая значение полной фазы в момент времени $t = 0$. Иначе уравнение (1) переписывается через частоту сигнала f (2):

$$u(t) = U \sin(2\pi ft + \varphi_0). \quad (2)$$

В общем случае излучаемый сигнал имеет (Рис.8) комбинированную форму периодического сигнала, например тонального, с нулевым. Данная форма необходима для минимизации наложений и помех полезного импульса при проведении измерений.

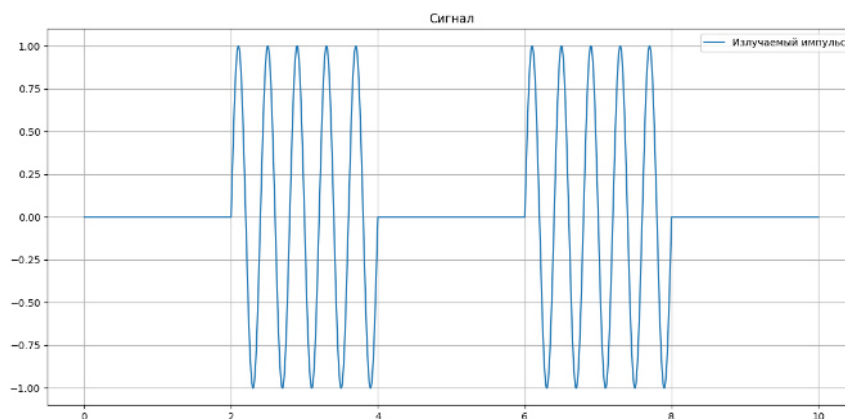


Рис.8 – Пример общей формы генерируемого сигнала

Данную форму с полезным тональным сигналом описывается как (3)

$$u(t) = \begin{cases} U \sin(2\pi ft + \varphi_0), & t \in [T_0, T_0 + l_s] \\ 0, & t \in [T_1, T_1 + l_z], \end{cases} \quad (3)$$

где T_0 – период повторения тонального сигнала, l_s – длительность тонального импульса, T_1 – период нулевого сигнала, l_z – длительность нулевого импульса.

Математическая модель системы автоматизации поканальной обработки данных преобразователей (11) основывается на поиске АФЧХ исследуемых сигналов преобразователей с единовременным поиском участков полезных импульсов методом кросс-корреляции, для сигналов, полученных из системы коммутации, к которым применяется быстрое преобразование Фурье.

Представление сигнала $u(t)$, который подается на выход канала демультиплексора с тремя управляющими входами описывается как (4):

$$\phi(A_0, A_1, A_2, EN, u(t)) = (EN \overline{A_0} \overline{A_1} \overline{A_2})(u(t)Y_0) + \dots + (EN A_0 A_1 A_2)(u(t)Y_7), \quad (4)$$

где $u(t)$ – входной сигнала, который передается на канал преобразователя, $Y_0, Y_1, \dots, Y_7$ – выходы демультиплексора, EN, A_0, A_1, A_2 – сигналы управления.

Функция (2) описывает, что при подаче различных битовых комбинаций A_0, A_1, A_2 , при подаче сигнала переключения EN активируется

только один выход $Y_0, Y_1, \dots, Y_7$. Управление одним каскадом описывается как (5):

$$\phi_i(A_i, EN_i, u(t)) = \sum_{j=0}^7 \left(EN_i \prod_{k=0}^2 B_{i,j,k}(A_i) u(t) Y_{i,j} \right), \quad (5)$$

где $B_{i,j,k}(A_i)$ – бит активного входного канала для текущего демультиплексора, т.е. логическую комбинацию из логических значений A_0, A_1, A_2 ; $Y_{i,j}$ – выход j – демультиплексора для уровня i , тогда уравнение для каскада описывается (6):

$$\Phi_c(A_i, EN_i, u(t)) = \prod_{n=0}^{n-1} \phi_i(A_i, EN_i, u(t)), \quad (6)$$

где n – уровень каскада.

Для поиска позиции полезного импульса используется метод кросс-корреляции. Зная длительность и частоту сигнала $x(t)$, а также частоту дискретизации, создается сигнал $y(t)$ аналогичной формы, с длительностью, например, в двое меньше генерируемого и той же частоты. Результат кросс-корреляции описывается как (7):

$$C(t) = \int [x(\tau) \cdot y(t - \tau)] d\tau, \quad (7)$$

где $C(t)$ – результат кросс-корреляции, τ – сдвиг времени, изменяемый от 0 до длительности периодического сигнала. Вычисляя значения кросс-корреляции для различных t , максимальное значение будет указывать на позицию по времени начала полезного сигнала. Обозначим результат поиска полезного сигнала, как (8):

$$S(t) = S(C(t)). \quad (8)$$

Для поиска АФЧХ необходимо выполнить преобразование Фурье для полезных импульсов опорного и измеряемого сигналов по закону (9):

$$S(f) = \int [S(t) \cdot e^{-j2\pi ft}] dt, \quad (9)$$

где f – частота, j – мнимая единица, t – время. Тогда поиск АФЧХ осуществляется по закону (10):

$$H(f) = \frac{S_{out}(f)}{S_{input}(f)}, \quad (10)$$

где $S_{out}(f)$, $S_{input}(f)$ – результаты выполнения преобразований Фурье для измеряемого и входного сигналов соответственно. Математическая модель системы автоматизации поканальной обработки многоканальных систем преобразователей описывается как (11):

$$H(f) = \frac{\int \left[S \left(\prod_{n=0}^{n-1} \phi_i \left(A_i, EN_i, u_{output}(t) \right) \right) * e^{-j \cdot 2\pi f t} \right] dt}{\int \left[S \left(\prod_{n=0}^{n-1} \phi_i \left(A_i, EN_i, u_{input}(t) \right) \right) * e^{-j \cdot 2\pi f t} \right] dt} . \quad (11)$$

Заключение.

Разработана обобщенная модель автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения, представленных в виде многоканальных систем преобразователей. Модель автоматизации основывается на разработанных соответствующих структурной и математической моделях. Обобщенная модель является базой для создания алгоритмов и программных продуктов, позволяющих автоматизировать процесс контроля качества изделий приборостроения, представленных в виде многоканальных систем преобразователей.

Исследования выполнены в рамках проекта No FSFS-2024-0012.

Библиографический список.

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 28.09.2015. – М.: Стандартинформ, 2020. – 32 с.
2. ГОСТ Р МЭК 62127-3-2010. Гидрофоны. Общие требования к характеристикам для измерений параметров ультразвуковых полей в частотном диапазоне от 0,5 до 40 МГц. Введ. 21.12.2010. – М.: Стандартинформ, 2012. – 19 с.
3. ГОСТ Р 53188.1 2008 (МЭК 61672-1: 2002). Шумомеры. Часть 1. Технические требования. Введ. 18.12.2008. – М.: Стандартинформ, 2009. – 36 с.
4. ГОСТ Р 53576 – 2009 (МЭК 60268-4:2004). Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров. Введ. 18.12.2008. – М.: Стандартинформ, 2009. – 50 с.
5. ГОСТ 32783 – 2014 Датчики индуктивно-проводные. Требования безопасности и методы контроля. Введ. 10.09.2014. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.
6. ГОСТ Р ИСО 16063-15 – 2012. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 15. Первичная калибровка датчиков угловой вибрации методами лазерной интерферометрии. Введ. 29.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2014. – 39 с.
7. ГОСТ Р 59166 – 2020. Оптика и фотоника. Датчики температуры волоконно-оптические распределенные. Методы испытаний. Введ. 10.11.2020. – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.
8. ГОСТ Р МЭК 60770-2 – 2015. Датчики для применения в системах управления промышленным процессом. Часть 2. Методы приемочных и типовых испытаний. Введ. 22.06.2015. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-4-2011. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Часть 4. Общие термины в области радиосвязи. Введ. 30.05.2011. – М.: Стандартинформ, 2012. – 32 с.
10. Овчарук В.Н. Регистрация и корректировка спектральных функций акустических сигналов многоканальной акустико-эмиссионной системы / В.Н. Овчарук // Информационные технологии XXI века: сборник научных

- трудов. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. – С. 67-72. – EDN YOVTNS.
11. Овчарук В.Н. Особенности регистрации акустических сигналов в многоканальных акустико-эмиссионных системах / В.Н. Овчарук, В.А. Павлов // Информационные технологии XXI века: Сборник научных трудов / Отв. ред. В.В. Воронин. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. – С. 117-123. – EDN YPQXZZ.
12. Пестриков П.П. Многоканальная измерительная система для регистрации сигналов поверхностной электромиографии мышц предплечья / П.П. Пестриков, Т.В. Пестрикова // Молодые ученые – Хабаровскому краю: Материалы XXI краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 15-18 января 2019 года / Редакционная коллегия: И.Н. Пугачев, А.М. Сундуков, А.А. Самойлик. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. – С. 108-113.
13. Николаева Д.В. Многоканальная система регистрации и сбора данных диагностик плазмы установки ИТЭР / Д.В. Николаева, П. В. Зубарев, Е. Ю. Миронова [и др.] // XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу : Сборник тезисов докладов, Звенигород, 02-06 апреля 2019 года. – Звенигород: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2019. – С. 349. – EDN OYDCDD.
14. Овчарук В.Н. Применение методов спектрального анализа в многоканальных системах регистрации сигналов акустической эмиссии / В.Н. Овчарук, Чье Ен Ун // Приборы. – 2021. – № 11(257). – С. 35-39.
15. Казначеев П.А. Алгоритм регистрации сейсмоакустических сигналов с многоканальной коммутацией при неизвестном уровне высокочастотных помех / П.А. Казначеев, К.С. Непейна // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XI Международной конференции молодых ученых и студентов. В 2-х томах, Бишкек, 24-26 апреля 2019 года. – Бишкек: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, 2019. – С. 85-88. – EDN CDHPUS.
16. Козлов С.В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С.В. Козлов, Т.Х. Ву // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 15. – DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.

¹Шлаев Виктор Иванович, аспирант, shl.vik.iv@gmail.com, Россия, Москва, МГТУ «Станкин»

²Бильчук Мария Викторовна, канд. техн. наук, доц., mbilchuk@stankin.ru, Россия, Москва, МГТУ «Станкин»

Shlaev Victor Ivanovich, Postgraduate Student, shl.vik.iv@gmail.com, Russia, Moscow, MSUT «Stankin»

Bilchuk Maria Victorovna, Candidate of Technical Sciences, Docent, mbilchuk@stankin.ru, Russia, Moscow, MSUT «Stankin»

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКОЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ МИКРОБНОГО БЕЛКА НА ОСНОВЕ МНОГОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ

Тугашова Л.Г.¹, Тагиров А.Ф.²

AUTOMATION AND CONTROL OF A MICROBIAL PROTEIN PRODUCTION UNIT BASED ON MULTIPLE-CONTOUR SYSTEMS

Tugashova L.G.¹, Tagirov A.F.²

Аннотация. Рассмотрена возможность построения моделей системы управления уровнем pH среды на установке получения микробного белка с применением многоконтурных систем. Осуществлен выбор входных и выходных параметров ферментера. Предложена функциональная схема автоматизации объекта. Получена имитационная модель объекта. Разработана структура комплекса технических средств. Выполнено построение и тестирование структуры в виде двухконтурных систем в программе Codesys. Применение предложенной модели системы управления уровнем pH среды направлено на повышение качества выходного продукта.

Abstract. The possibility of building models of the pH control system for the microbial protein production unit using multi-loop systems has been considered. The input and output parameters of the fermenter have been selected. A functional diagram of the object's automation has been proposed. An object simulation model has been obtained. The structure of the technical equipment complex has been developed. The structure has been built and tested as a two-loop system using the Codesys software. The proposed model of the pH control system aims to improve the quality of the output product.

Ключевые слова. Управление, имитационная модель, ферментер, регулирование, уровень pH среды, расход, контроллер, частотный преобразователь.

Keywords. Control, simulation model, fermenter, regulation, pH level, flow rate, controller, frequency converter.

Введение.

Биоэкономика основана на превращении возобновляемых биологических ресурсов в биоэнергию, промышленную, пищевую, кормовую и иную продукцию. В марте 2025 года Комиссией НТР России одобрен паспорт национального проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики». В рамках национального проекта по биоэкономике задача автоматизации и управления установкой по получению микробного белка представляется актуальной.

Установка по производству микробного белка предназначена для получения кормового протеина из метана, содержащегося в природном газе. Продукцией установки получения микробного белка является инактивированная высушенная биомасса.

Процесс основан на способности специфических метанотрофных

бактерий *Methylococcus capsulatus* использовать метан в качестве источника углерода и энергии для роста. За счет целенаправленного культивирования данных микроорганизмов в условиях, поддерживаемых внутри ферментеров (температура, pH среды, концентрации кислорода и питательных веществ), достигается высокая скорость синтеза биомассы и ее накопление в виде бактериальной суспензии.

Целью работы является разработка системы регулирования уровня pH среды в ферментере.

Обзор литературы.

В статье [1] рассматривается производство кормового белкового концентрата из природного газа микробиологическим способом. Авторы приходят к выводу о перспективности производства белково-витаминного концентрата из гаприна. В [2] разработана многорежимная система управления режимом аэрации в биотехнологическом процессе на основе комбинации принципов аппроксимирующего управления и нечеткой коррекции параметров алгоритма управления. В работе [3] предложено использование аппроксимирующих нелинейных функций при математическом моделировании и управлении процессом ферментации.

Статья [4] посвящена проблеме точного регулирования водородного показателя в мини-биореакторах. В [5] предложено автоматическое регулирование кислотно-щелочного баланса питательной воды, подаваемой в котельный цех теплоэнергоцентрали на основе SCADA-систем.

В статье [6] обоснована необходимость и актуальность математического моделирования биотехнологических процессов в современных условиях максимальной автоматизации и компьютеризации производств. В [7] рассматривается способ получения кормового белка на метане, что является экологически эффективным и экономически выгодным для решения проблем животноводства. В работе [8] исследована работа системы управления ферментатором, выявлено влияние параметров настройки регулятора на качество переходного процесса системы.

Материалы и методы.

Типовая установка по получению микробного белка содержит несколько технологических секций: узел приготовления рабочего раствора питательных солей; ферментации; сепарации; инактивации; сушки и др. Узел производственной ферментации содержит ферментер, эжектор, насос, теплообменник.

В ферментере циркулирует бактериальная суспензия, которая уходит в теплообменники, где охлаждается и возвращается обратно в ферментер через эжекторы. Рабочее значение температуры в ферментере находится в диапазоне 40–42 °С.

Важные контролируемые и регулируемые параметры в узле производственной ферментации: уровень pH суспензии биомассы в ферментере и на его выходе; температура в ферментере и после теплообменника; гидростатический уровень; содержание кислорода, метана и углекислого газа в отходящих газах из ферментера с помощью газоанализатора.

На Рис.1 приведена функциональная схема автоматизации ферментера как основного объекта технологической установки.

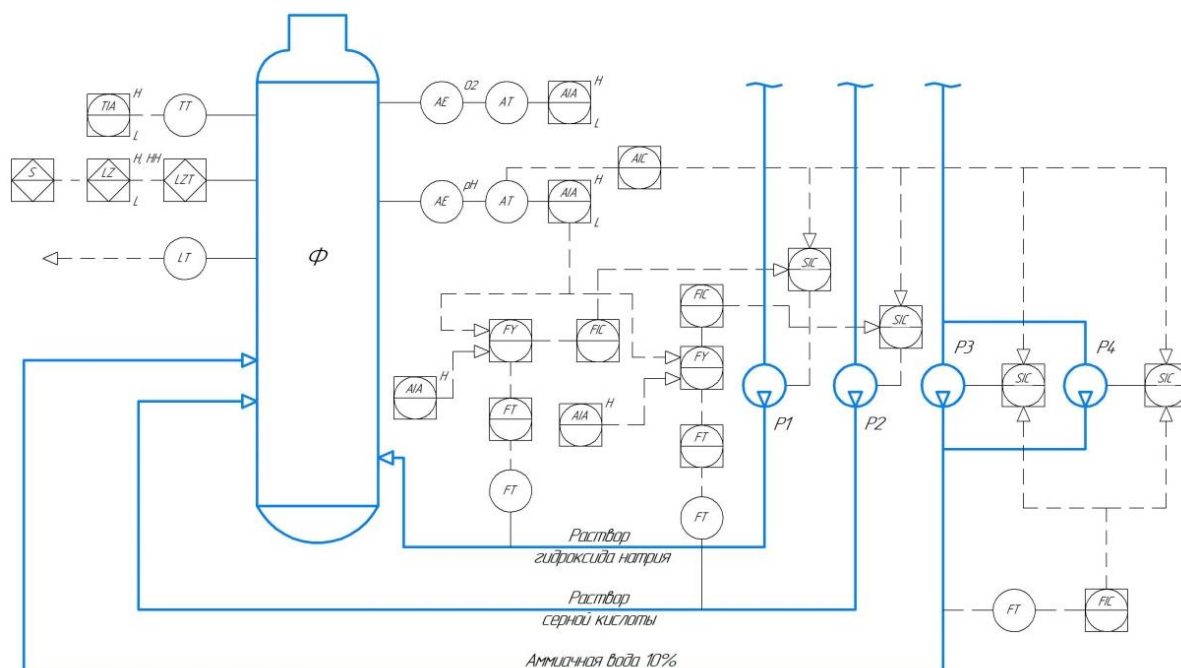


Рис.1 – Функциональная схема автоматизации ферментера

Для измерения уровня pH в ферментере используются электродные датчики pH Memosens CPS171D. Расход измеряется с помощью расходомера ЭМИС ВИХРЬ 200. Схема содержит частотные преобразователи SIC.

Результаты.

При производстве микробного белка для поддержания качества выходного продукта необходимо обеспечивать оптимальный уровень pH среды, в которой происходит выращивание метанооксиляющих микроорганизмов. Бактерии *Methylococcus capsulatus* стабильно растут при pH среды в пределах 5,6-5,8 [9]. В нашем случае примем уставку pH равной 5,7.

Поддержание заданного уровня pH среды происходит путем регулирования подачи 10% аммиачной воды по показаниям датчиков pH. Корректировка уровня pH при избытке ионов азота происходит путем подачи раствора 5% гидроксида натрия и раствора 5% серной кислоты.

Входными потоками аппарата являются кислород технический или воздух, природный газ, раствор питательных солей, 10% аммиачная вода, осветленная культуральная жидкость (ОКЖ). Выходными потоками являются суспензия на сепарацию, абгазы (метан, кислород, углекислый газ).

Выбраны четыре основных потока, влияющих на pH. Другие потоки малозначительно влияют на изменение выходного параметра. Основной поток – 10% аммиачная вода, которая повышает pH среды. Однако при избытке азота в среде защелачивание происходит с помощью гидроксида натрия 5%. В случае, когда среда становится слишком щелочной, pH среды понижается с помощью серной кислоты 5%. Также на уровень pH влияет поток ОКЖ, являющийся возмущением и в нашем случае не учитывается.

С учетом вышеперечисленных факторов построим схему входных и

выходных потоков, влияющих на уровень pH среды ферментации (Рис.2).



Рис.2 – Входные и выходные потоки ферментера

Получены дифференциальные уравнения материального баланса и изменения уровня pH среды в ферментере:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{S} (G_1 + G_2 + G_3 - G_4 + G_5), \quad (1)$$

$$S \cdot h \cdot \frac{dC}{dt} = G_1 \cdot C_{NH_4OH} + G_2 \cdot C_{NaOH} + G_3 \cdot C_{H_2SO_4} - G_4 \cdot C + G_5 \cdot C_{ОКЖ}, \quad (2)$$

где S – площадь основания ферментера; G_1 – поток раствора аммиачной воды 10%; G_2 – поток раствора щелочи (гидроксида натрия 5%); G_3 – поток раствора кислоты (серной кислоты 5%) G_4 – поток отходящей бактериальной суспензии G_5 – поток ОКЖ; C – молярная концентрация; $V=S \cdot h$ – рабочий объем ферментера.

Из системы уравнений (1) и (2) с учетом основ химии можно определить уровень pH. Для этого воспользуемся ионным произведением дистиллированной воды при 25 °C:

$$K = [H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14} \text{ моль}^2/\text{л}^2, \quad (3)$$

Необходимо учитывать следующее условие:

$$T = [OH^-] + [OH^-] - 2 \cdot [H^+] = [NH_4^+] + [Na^+] - [SO_4^{2-}]. \quad (4)$$

Концентрация $[H^+]$, которая эквивалентна pH, найдена при помощи формул (3) и (4). В результате преобразований получена следующая система:

$$\begin{cases} C_H = \frac{\sqrt{T^2 + 16 \cdot K}}{4} - \frac{T}{4}, T > 0, \\ C_H = \sqrt{K}, T = 0, \\ C_H = -\frac{\sqrt{T^2 + 16 \cdot K}}{4} + \frac{T}{4}, T < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для построения системы автоматического управления (САУ)

уровнем рН среды используется водородный показатель рН, который определяется как отрицательный десятичный логарифм концентрации ионов водорода, рассчитанной по формуле (5). Так как концентрации и уровень рН среды связаны, то в уравнении (2) выполним замену C на рН.

Разработка системы управления уровнем рН в ферментере.

Для реализации вышеприведенных уравнений воспользуемся программой Matlab Simulink. Общая структура математической модели показана на Рис.3.

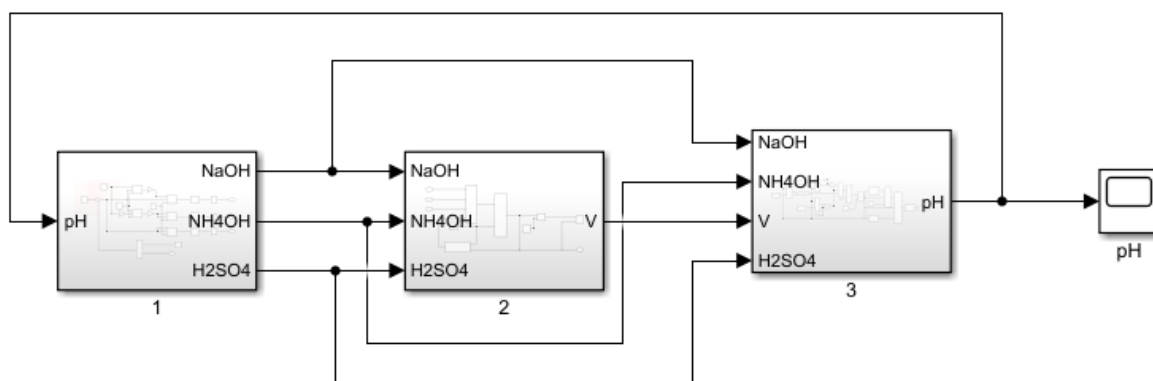


Рис.3 – Общая структура модели в Matlab Simulink

Модуль 1 общей структуры представляет собой блок регуляторов уровня рН среды (Рис.4). В модулях 2 и 3 реализованы модели объекта, представленные уравнениями (1) и (2).

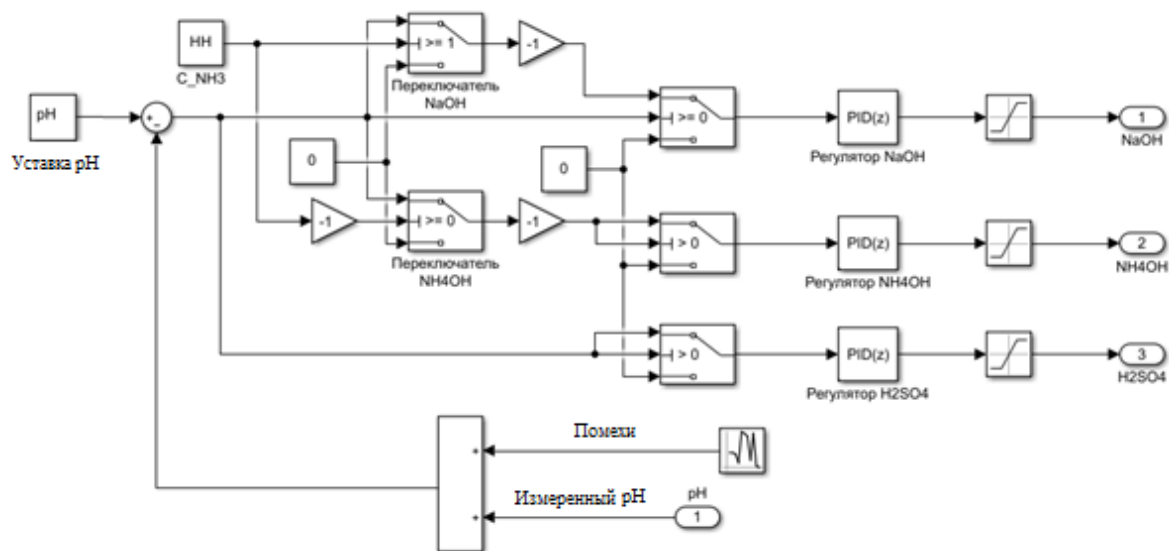


Рис.4 – Структура блока регуляторов уровня рН среды

Переключатели обеспечивают выбор нужного потока. Блок C_NH_3 обозначает концентрацию азота в среде.

После построения имитационной модели САУ уровнем рН среды получена переходная характеристика (Рис.5).

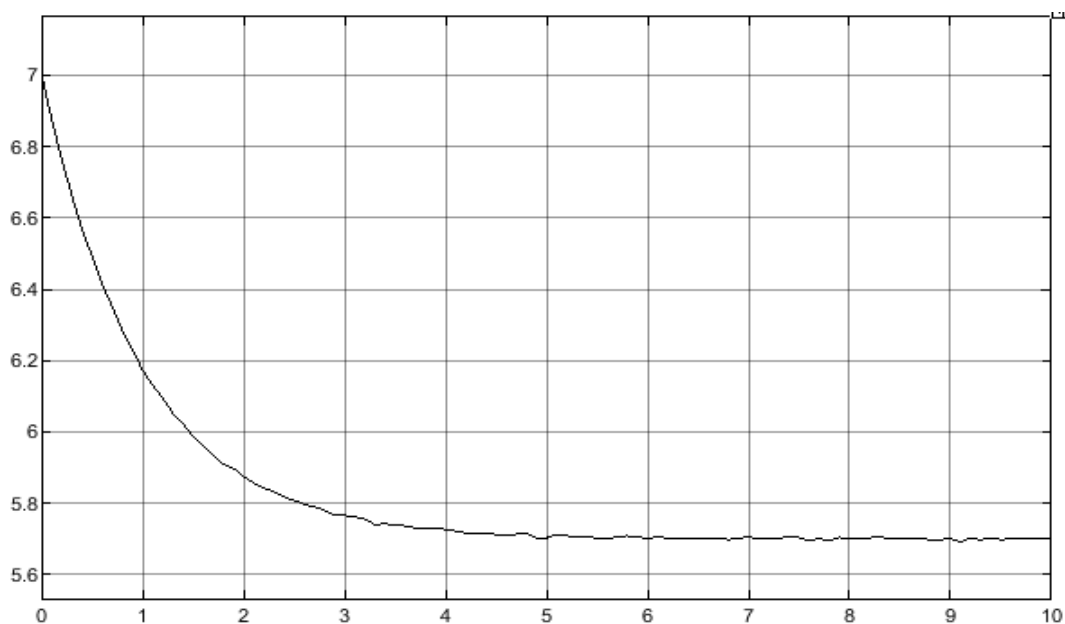


Рис.5 – Переходная характеристика системы управления уровнем pH

Можно заметить небольшие колебания в пределах $\pm 0,01$ pH, что обусловлено погрешностью датчика pH.

Разработка структурной схемы САУ и расчет передаточных функций.

В системе регулирования уровнем pH участвуют четыре основных потока (ОКЖ, аммиачная вода, гидроксид натрия и серная кислота). Для каждого потока осуществляется регулирование подачи с помощью дозировочного или центробежного насосов. Для регулирования расхода ОКЖ применяется регулирующий клапан КМР. На Рис.6 представлена структурная схема комплекса технических средств (КТС), включающая все сигналы, которые участвуют в регулировании уровня pH в ферментере.

На линиях подачи гидроксида натрия и серной кислоты установлены дозировочные насосы со встроенными частотными преобразователями.

Сигналы от контроллера на них передаются напрямую по протоколу Modbus RTU. На линии подачи аммиачной воды установлен центробежный насос. В качестве частотного преобразователя выбран ОВЕН ПЧВ102-1.5K-380.

Структурная схема с обозначением всех параметров процесса регулирования pH приведена на Рис.7.

Для каждого элемента в системе регулирования получена передаточная функция. Например, передаточная функция для дозировочных насосов определена следующим образом:

$$W_{\text{дв+н}}(p) = \frac{Q}{U_2} \cdot \frac{1}{Tp+1}, \quad (6)$$

где Q – расход соответствующего потока; U_2 – напряжение питания насоса; T – постоянная времени.

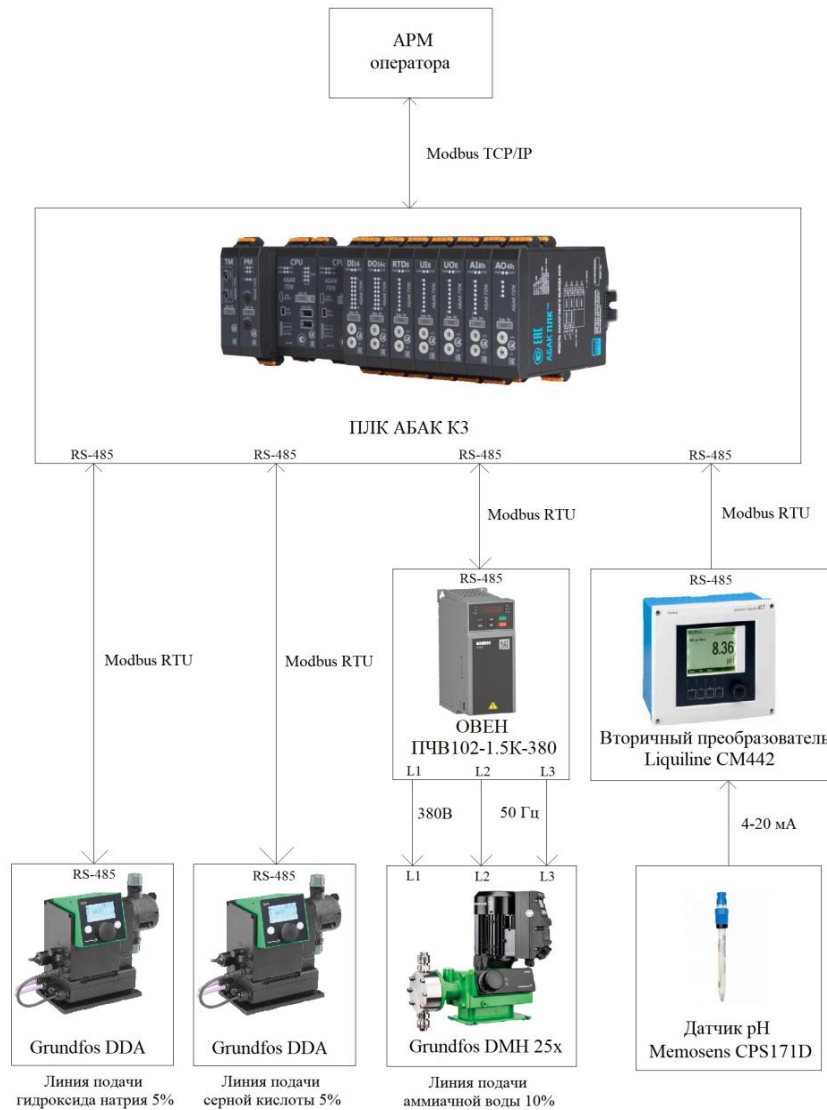


Рис.6 – Структурная схема КТС регулирования pH среды

По формуле (6) найдем для примера передаточную функцию для насоса Grundfos DMH 25х:

$$W_{\text{ДВ+Н}}(p) = \frac{0,1298}{380} \cdot \frac{1}{2p+1} = \frac{0,0003416}{2p+1}.$$

Так как у насосов Grundfos DDA имеется встроенный частотный преобразователь, то передаточная функция для них определяется следующим образом:

$$W_{\text{ЧП+ДВ+Н}}(p) = W_{\text{ЧП}}(p) \cdot W_{\text{ДВ+Н}}(p) = k \cdot \frac{Q}{U_2} \cdot \frac{1}{Tp+1}. \quad (7)$$

Датчик уровня pH среды и расходомеры представлены передаточными функциями апериодического звена первого порядка.

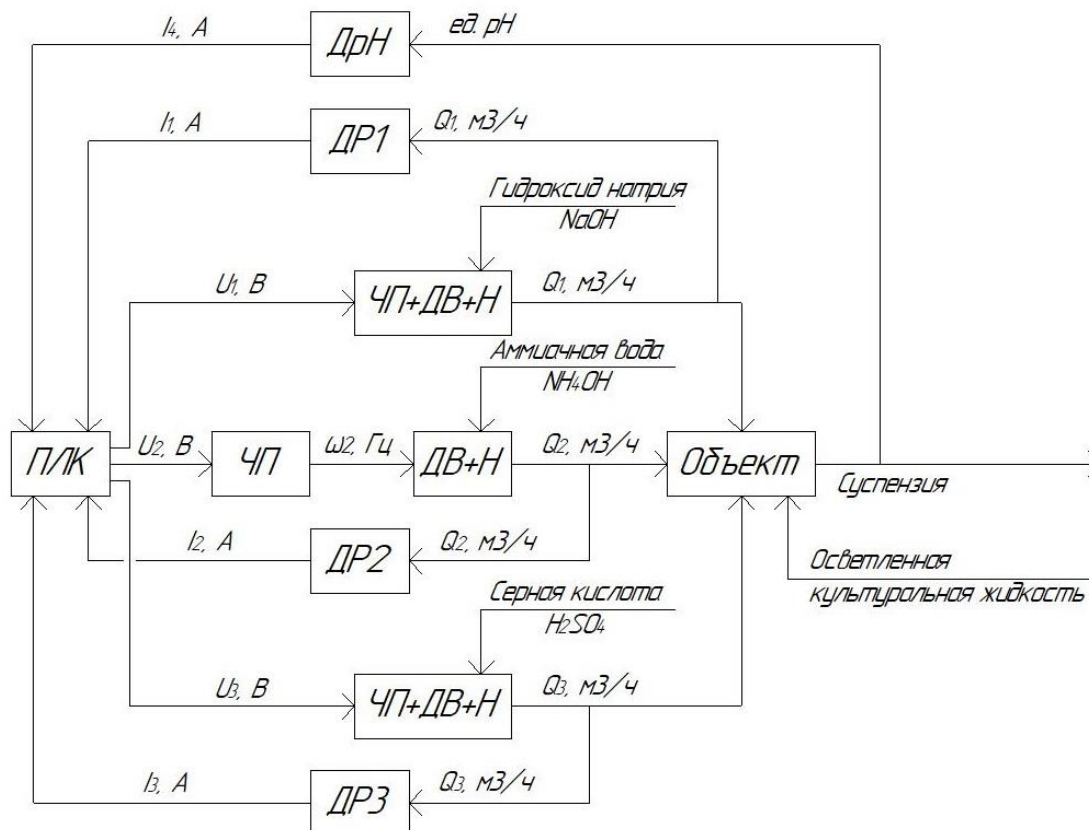


Рис.7 – Система автоматического управления показателем pH в процессе ферментации микробного белка: ПЛК – программируемый логический контроллер, ЧП – частотный преобразователь, ДВ – двигатель, Н – насос, ДР – датчик расхода, ДрН – датчик pH, U – напряжение, I – сила тока, Q – расход, ω – частота вращения насоса

Для вывода передаточных функций объекта (ферментера) воспользуемся уравнением (2). Перенесем в уравнении (2) переменную $G_4 \cdot C$, по которой происходит дифференцирование, в левую часть. Для получения передаточной функции объекта принимаем, что возмущение (расход ОКЖ) равно нулю. Разделим каждую переменную дифференциального уравнения на G_4 .

Дифференциальное уравнение имеет вид:

$$T \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_1 x(t), \quad (8)$$

где $y(t)$ – выходной параметр; $x(t)$ – входной параметр; k_1 – передаточный коэффициент; T – постоянная времени объекта.

С помощью преобразования Лапласа переходим к изображениям и получаем передаточные функции по каналам «расход аммиачной воды – уровень pH среды», «расход гидроксида натрия – уровень pH среды», «расход серной кислоты – уровень pH среды». Определяем численные значения передаточного коэффициента и постоянной времени объекта по каждому каналу.

Когда концентрация азота не находится на предельном значении и

идет процесс подщелачивания среды, то на объект поступает лишь аммиачная вода. В этом случае уравнение (8) примет вид:

$$\frac{Sh}{G_4} \cdot \frac{d(pH)}{dt} + pH = k_1 \cdot G_1, \quad (9)$$

где $k_1 = \frac{C_{NH_4OH}}{G_4}$; $T = \frac{Sh}{G_4}$.

Используя регламентные значения параметров, определяем k_1 и T .

Когда концентрация азота находится на предельном уровне, среда в ферментере также требует подщелачивания, тогда поступает поток гидроксида натрия. Для этого случая аналогично (9) получаем:

$$\frac{Sh}{G_4} \cdot \frac{d(pH)}{dt} + pH = k_2 \cdot G_2, \quad (10)$$

Аналогично выведем передаточную функцию для объекта в случае процесса подкисления среды раствором серной кислоты:

$$\frac{Sh}{G_4} \cdot \frac{d(pH)}{dt} + pH = k_3 \cdot G_3. \quad (11)$$

Моделирование системы управления pH в CoDeSys.

Учитывая полученные передаточные функции элементов САУ (для отдельных технических средств и для объекта управления (ферментера)), в программе CoDeSys версии 3.5 построена схема автоматического регулирования уровня pH среды при поступлении аммиачной воды.

Для управления объектом могут применяться такие отечественные контроллеры, как ОВЕН ПЛК210, RealLab! NLcon-LXD, Regul R500 и R600, КСА-02, АБАК КЗ и др. [10].

Алгоритм и программа управления используют в качестве входных параметров заданное значение уровня pH среды и текущее измеренное значение. На основе их разности вычисляется управляющее воздействие в соответствии с ПИД-алгоритмом. Это воздействие определяет необходимый расход потока. Далее происходит сравнение требуемого расхода с текущим и по разности между ними формируется команда на регулирование требуемой скорости электродвигателя. В результате формируется выходной параметр – рассчитанная частота вращения двигателя, обеспечивающая достижение заданного уровня pH среды. Аналогичным образом построены двухконтурные системы при поступлении гидроксида натрия и серной кислоты.

Проект в CoDeSys протестирован, построен график переходного процесса, приведенный на Рис.8.

Заданное значение параметра показано синей линией, а измеренное – зеленой.

Заключение.

Решена задача регулирования уровня pH среды в ферментере установки получения микробного белка. Получена имитационная модель

объекта. Разработана функциональная схема автоматизации объекта. Осуществлен выбор КТС системы управления. Выполнен расчет передаточных функций элементов САУ. Реализованная в CoDeSys модель системы управления показала работоспособность предложенного решения.

В качестве перспективы исследований предполагается дополнение системы реализацией кинетики роста биомассы, теплопередачи в аппарате, а также учет возмущающего воздействия, например, в виде каскадно-комбинированной системы.

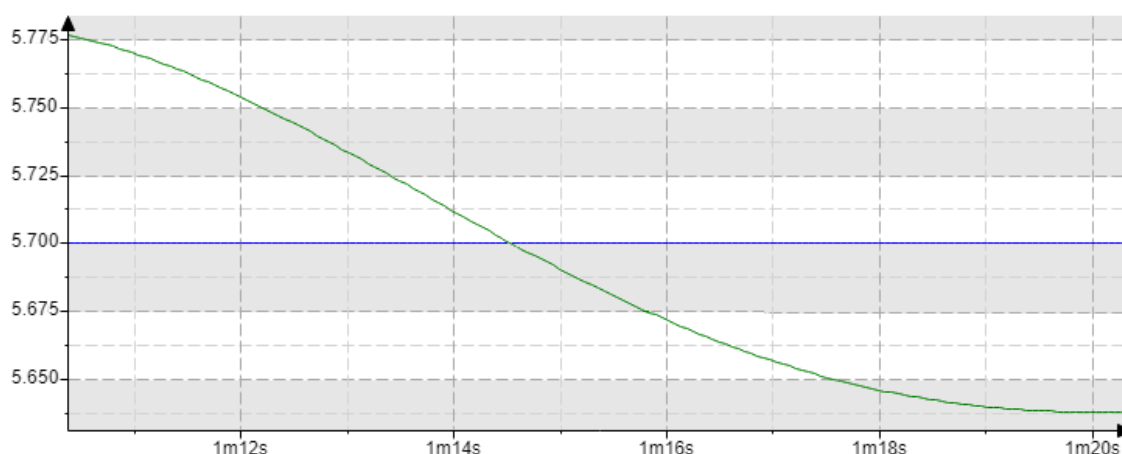


Рис.8 – Переходный процесс регулирования уровня pH среды в CoDeSys (фрагмент)

Библиографический список.

1. Голимблевская А.А. Гаприн: новые возможности переработки природного газа / А.А. Голимблевская, Е.А. Зайцева, И.А. Петрова [и др.] // Neftegaz.RU. – 2023. – № 10. – С. 114-118.
2. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система управления режимом аэрации в биореакторе периодического действия / В.Ф. Лубенцов, Е.А. Шахрай, Е.В. Лубенцова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 3. – С. 22-29.
3. Лубенцова Е.В. Моделирование и управление процессом ферментации с применением аппроксимирующих функций / Е.В. Лубенцова, Д.Л. Пиотровский // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. – № 4(231). – С. 192-199.
4. Донской Д.Ю. Математическая модель системы управления pH в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта домашней птицы / Д.Ю. Донской, А.Д. Лукьянов, В. Филипович [и др.] // Информатика, вычислительная техника и управление. – 2023. – № 23. – С. 95-106.
5. Кузовенков Л.С. Автоматическое регулирование кислотно-щелочного баланса питательной воды, подаваемой в котельный цех теплоэнергоцентрали на основе SCADA- систем / Л.С. Кузовенков // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции, 11 июня 2016 г. – С. 7-12.
6. Тишин В.Б. Особенности поиска математических моделей кинетики культивирования микроорганизмов / В.Б. Тишин, А.В. Федоров //

- Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2016. – № 4. – С. 65-74.
7. Любинская Т.В. Получение кормового белка из биогаза полигона ТБО / Т.В. Любинская, В.С. Орлова, В.С. Любинский // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – №2. – С. 100-104.
8. Лапшенков Г.И. Управление ферментатором аэробных микроорганизмов / Г.И. Лапшенков, М.С. Ленский, А.А. Сумбаева // Вестник МИТХТ. – 2009. – Т. 4. – №2. – С. 80-84.
9. Патент № 2613365 Российская Федерация, МПК C12N 1/20 (2006.01), A23K 10/10 (2016.01). Штамм метанооксиляющих бактерий *Methylococcus capsulatus* ГБС-15 для получения микробной белковой массы : № 2016113268 : заявл. 07.04.2016 : опубл. 16.03.2017 / Бабурченкова О.А., Бабусенко Е.С., Градова Н.Б., Лалова М.В., Сафонов А.И., Тухватуллин И.А. ; заявитель ООО ГИПРОБИОСИНТЕЗ. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
10. Тугашова Л.Г. Формирование процесса обучения студентов нефтяного профиля в условиях импортозамещения / Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова // Управление техносферой: электрон. журнал. – 2024. – Т.7. – Вып.4. – С. 597-608. – URL: <https://technosphere-ing.ru>.

¹Тугашова Лариса Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., доцент, tugashova@yandex.ru, Россия, Альметьевск, ГАОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

²Тагиров Айрат Фанилевич, студент, airat.tagirov04@mail.ru, Россия, Альметьевск, ГАОУ ВО «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»

Tugashova Larisa Gennad'evna, Candidate of Technical Sciences, Docent, Assoc. Professor, tugashova@yandex.ru, Russia, Almetьевsk, Almetьевsk State Technological University «Higher School of Petroleum»

Tagirov Ayrat Fanilevich, student, airat.tagirov04@mail.ru, Russia, Almetьевsk, Almetьевsk State Technological University «Higher School of Petroleum»

ОПТИМИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Жмудь В.А.¹, Асет А.², Ахметова А.М.³, Абдилдаева А.А.⁴

OPTIMIZATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE OF WATER PRESSURE IN WATER SUPPLY DISPATCHING

Zhmud V.A.¹, Asset A.², Akhmetova A.M.³, Abdildayeva A.A.⁴

Аннотация. Рассматривается применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей в диспетчеризации водоснабжения, для контроля давления воды в режиме реального времени и эффективного управления системой. Описываются методы использования ИИ для оптимизации давления воды в диспетчерской системе водоснабжения, их преимущества и практические результаты. Доказано, что модели, основанные на искусственном интеллекте, повышают надежность и эффективность системы. Кроме того, результаты исследования показывают необходимость перехода диспетчерского управления к автоматизированным и интеллектуальным системам.

Abstract. The application of artificial intelligence (AI) technologies and neural networks in water supply dispatching is considered, for real-time water pressure monitoring and effective system management. The methods of using AI to optimize water pressure in a water supply dispatching system, their advantages and practical results are described. It is proven that models based on artificial intelligence increase the reliability and efficiency of the system. In addition, the results of the study show the need to transition dispatching control to automated and intelligent systems.

Ключевые слова. Водоснабжение, нейронная сеть, база данных, оптимизация.

Keywords. Water supply, neural network, database, optimization.

Введение.

Требования к системам водоснабжения и диспетчеризации становятся всё более сложными. Важно поддерживать давление воды на эффективном и стабильном уровне, так как это является ключевым условием надёжности системы и гарантией бесперебойной подачи качественной воды потребителям. Традиционные системы управления и диспетчеризации не всегда показывают достаточную эффективность, например при колебаниях спроса или аварийных обстоятельствах.

Развитие цифровых технологий, включая искусственный интеллект, открывает новые возможности в сфере водоснабжения. Алгоритмы, основанные на искусственном интеллекте с применением нейронных сетей, позволяют прогнозировать, регулировать и оптимизировать давление воды в режиме реального времени, что, способствует повышению энергоэффективности, надёжности и общей эффективности

системы водоснабжения.

Цель работы заключается в том, чтобы предложить эффективные методы оптимизации давления воды в системах диспетчеризации водоснабжения с применением технологий искусственного интеллекта.

Управление, мониторинг и оптимизация водных систем.

Рассматриваются теоретические и практические аспекты оптимизации давления воды в системе диспетчеризации водоснабжения с применением искусственного интеллекта, а также описываются преимущества существующих методов и перспективы их развития.

Такие алгоритмы позволяют не только прогнозировать давление воды [1], но и предсказывать спрос на воду с учетом погодных условий и других факторов. Это, в свою очередь, помогает планировать распределение ресурсов и управлять ими.

Отдельное внимание уделяется применению ИИ для обнаружения утечек воды: анализируя данные о давлении и скорости потока, нейронные сети способны выявлять малейшие отклонения, которые могут указывать на скрытые утечки [2]. Такой подход позволяет значительно сократить время обнаружения и устранения проблем, снижая потери воды. Технологии искусственного интеллекта используются для контроля давления и качества воды. Нейронные сети могут анализировать множество параметров, чтобы предупредить возможное загрязнение и обеспечить безопасность питьевой воды [3].

Практическая часть исследования основана на данных за последние три года из базы данных системы водоснабжения ГКП на ПХВ «Алматы су» [4]. В качестве примера рассматривается кейс по регулированию давления воды в жилом комплексе «Манхэттен» в Алматы (Таблица 1). Результаты показывают, что интеграция искусственного интеллекта в процессы диспетчеризации водоснабжения открывает новые возможности для оптимизации давления воды и делает систему более надежной и управляемой [5].

Алгоритм работы системы управления водоснабжением.

Работа искусственного интеллекта в системе водоснабжения – это процесс интеллектуального управления диспетчерской системой [6]. На Рис.1 представлен алгоритм системы водоснабжения жилого комплекса «Манхэттен» [7].

Для оптимального управления рассматриваемой интеллектуальной системой и повышения её надёжности проводится анализ на основе параметров системы водоснабжения, представленных в Таблице 1, для жилого комплекса «Манхэттен».

Нейронная сеть в водоснабжении.

Давление воды является ключевым параметром в системе водоснабжения, так как его колебания напрямую влияют как на потребителей, так и на надежность оборудования [8]. Из-за множества факторов (климатические условия, объем потребления, неисправности в сети и др.) классические методы моделирования (линейные, стационарные) часто не могут дать точный прогноз. На Рис.2 представлена модель нейронной сети, созданная на основе данных по давлению воды в одном из домов жилого комплекса «Манхэттен».

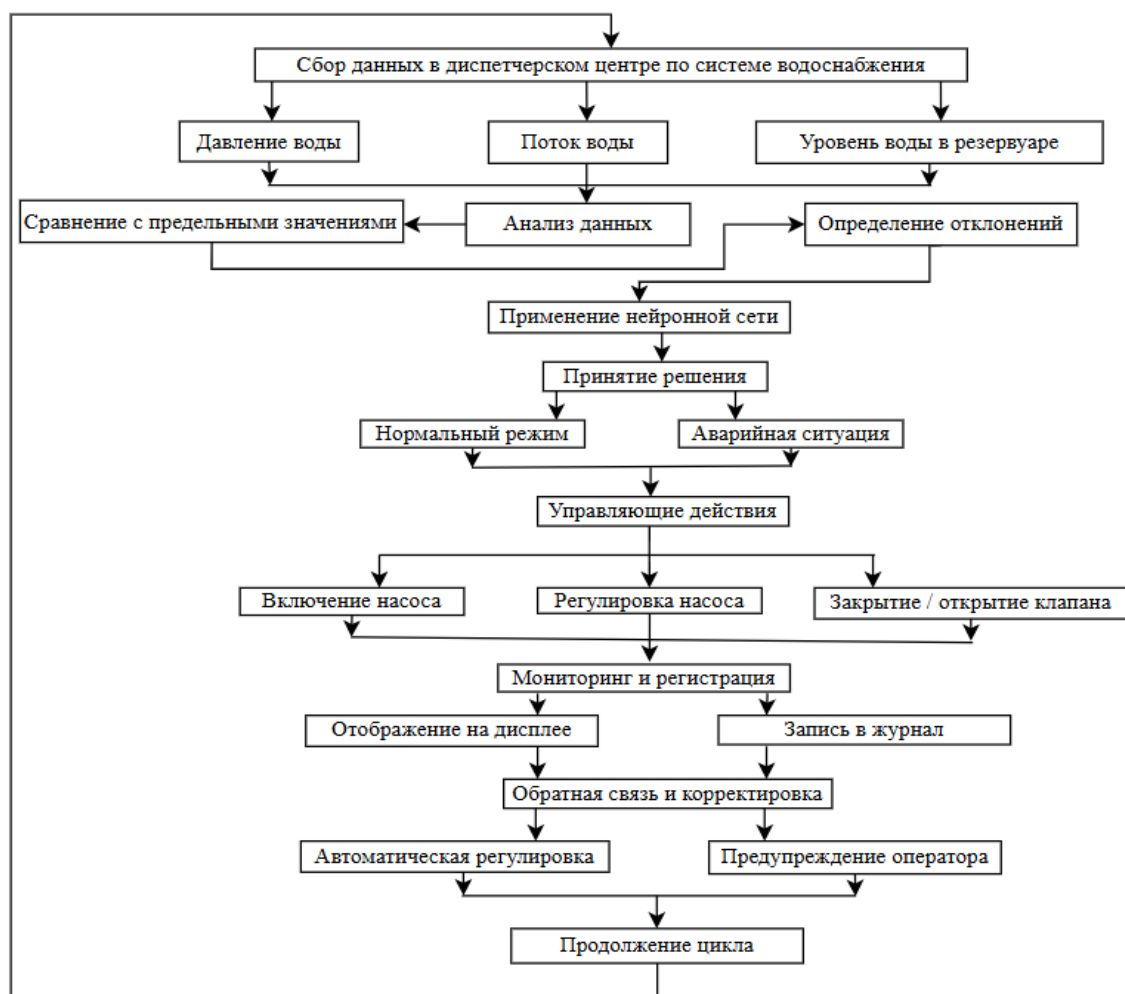


Рис.1 – Алгоритм работы системы управления водоснабжением ЖК «Манхэттен»

Таблица 1 – Данные по давлению холодной воды в жилом комплексе «Манхэттен» в городе Алматы

№	Срок	Давление холодной воды на 1-м этаже (бар)	Давление холодной воды на 10-м этаже (бар)	Давление холодной воды на 20-м этаже (бар)	Среднее давление (доступно)
1	01.02.2025	4,4	2,8	5,0	4,7
2	02.02.2025	3,4	2,6	4,5	4,0
3	03.02.2025	3,2	3,5	5,0	4,1
4	04.02.2025	3,6	3,5	5,2	4,4
5	05.02.2025	3,5	3,0	4,7	4,1
6	06.02.2025	3,9	3,1	5,1	4,5
7	07.02.2025	3,6	3,1	5,2	4,4
8	08.02.2025	3,6	2,5	4,8	4,2
9	09.02.2025	3,3	3,4	4,7	4,0
10	10.02.2025	3,5	2,0	4,7	4,1

Продолжение таблицы 1

11	11.02.2025	3,5	2,6	4,7	4,6
12	12.02.2025	3,5	3,5	4,1	3,8
13	13.02.2025	4,2	2,9	4,1	4,1
14	14.02.2025	4,4	2,9	4,1	4,3
15	15.02.2025	4,3	3,0	5,3	4,8
16	16.02.2025	3,4	2,6	4,1	3,7
17	17.02.2025	3,4	2,0	4,9	4,1
18	18.02.2025	3,2	2,8	4,2	3,7

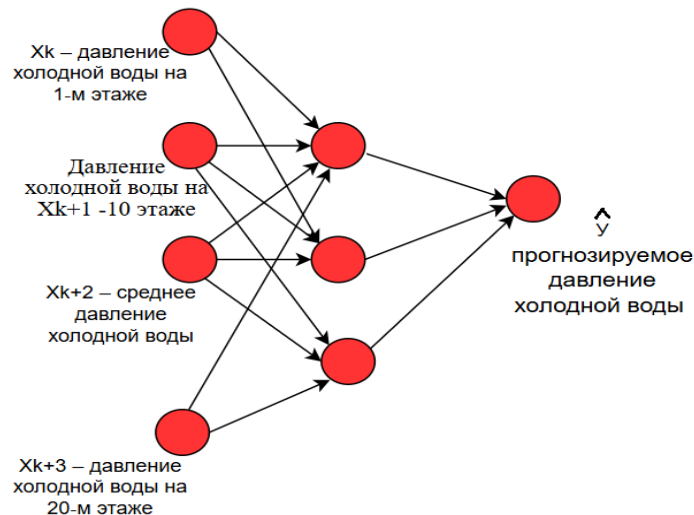


Рис.2 – Модель нейронной сети для системы водоснабжения ЖК «Манхэттен»

Математическая модель нейронной сети:

$$h_s = f(\omega_{ij}x_k + \omega_{ij+1}x_{k+1} + \omega_{ij+2}x_{k+2} + \omega_{ij+3}x_{k+3} + b_m) \quad (1)$$

где x_k – давление холодной воды на 1-м этаже, x_{k+1} – давление холодной воды на 10-м этаже, x_{k+2} – среднее давление холодной воды, x_{k+3} – давление холодной воды на 20-м этаже.

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} \omega_{ij} & \omega_{ij+1} & \omega_{ij+2} & \omega_{ij+3} \\ \omega_{i+1j} & \omega_{i+1j+1} & \omega_{i+1j+2} & \omega_{i+1j+3} \\ \omega_{i+2j} & \omega_{i+2j+1} & \omega_{i+2j+2} & \omega_{i+2j+3} \\ \omega_{i+3j} & \omega_{i+3j+1} & \omega_{i+3j+2} & \omega_{i+3j+3} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где ω_i – вес входного слоя на скрытый слой ($i=1....4$), ω_j – коэффициент влияния каждого входа сети на определённый нейрон ($j=1....4$), $b_m = [-0,39 \quad 0,050 \quad -0,14 \quad -0,42]$, b_m – перенос пространства скрытого слоя ($m=1....4$);

$$\vartheta_z = [-0,22 \quad -0,72 \quad -0,42 \quad -0,27];$$

g_z – веса скрытого слоя на выходной слой ($z = 1 \dots 4$),

$$\hat{y}_n = g_z h_s + g_{z+1} h_{s+1} + g_{z+2} h_{s+2} + g_{z+3} h_{s+3} + b_{m+3} \quad (3)$$

b_m – смещение (bias), добавляемое к выходному нейрону, чтобы модель могла корректно сдвигать прогноз независимо от входных данных, $g_z, g_{z+1}, g_{z+2}, g_{z+3}$ – вес восточного слоя, f – функция, $h_s, h_{s+1}, h_{s+2}, h_{s+3}$ – нейроны скрытого слоя. $\hat{y}_n$ – последний прогноз нейронной сети по давлению холодной воды ($n = 1 \dots 10$ то есть рассчитан только на первые 10 дней февраля 2025 года),

$$\hat{y}_1 = 0,47, \hat{y}_2 = 0,57, \hat{y}_3 = 0,59, \hat{y}_4 = 0,60, \hat{y}_5 = 0,55, \\ \hat{y}_6 = 0,33, \hat{y}_7 = -0,53, \hat{y}_8 = -0,28, \hat{y}_9 = -0,46, \hat{y}_{10} = -0,66.$$

Сравниваем фактические показатели нейронной сети по давлению холодной воды в ЖК "Манхэттен" с соответствующими показателями нейронной сети с прямой связью (Рис.3), поскольку значения давления холодной воды должны быть близкими друг к другу (здесь FNN – Feedforward Neural Network (нейронная сеть с прямой связью)).

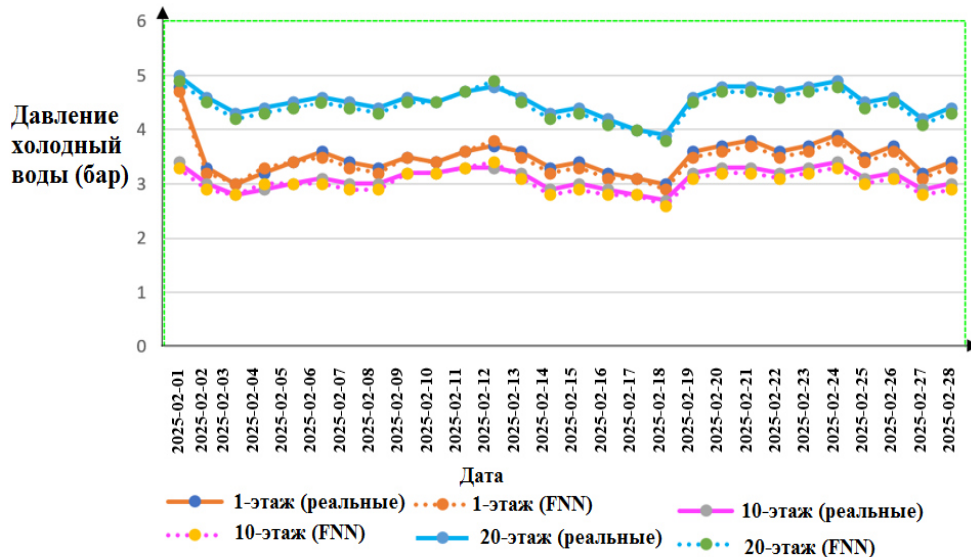


Рис.3 – Сравнительный график фактических показателей и показателей нейронной сети по давлению холодной воды в ЖК «Манхэттен»

Для оптимального управления системой водоснабжения применяется целевая функция, и на основе коэффициента, показывающего отклонение скорости потока холодной воды, оптимизированной скорости потока холодной воды, коэффициента отклонения давления холодной воды и других параметров составляется таблица 2, в которой T – текущая температура, T_{opt} – оптимизированная температура, C_V – коэффициент, отражающий значимость отклонения давления, P – текущее давление, P_{opt} – оптимизированное давление, C_P – коэффициент, отражающий значимость отклонения давления, V_{opt} – оптимизированная скорость потока холодной воды, C_T – коэффициент, отражающий значимость отклонения температуры.

Таблица 2 – Параметры для оптимального управления системой водоснабжения (на первые 10 дней февраля 2025 года)

№	T	$T_{onm.}$	C_V	P	$P_{onm.}$	C_P	$V_{onm.}$	C_T
1	12	10	0,01	1,9	3,5	0,05	1,4	0,2
2	13	11	0,02	1,8	4,0	0,01	1,5	0,3
3	14	12	0,03	1,7	3,8	0,04	1,6	0,4
4	15	10	0,02	1,5	4,2	0,03	1,8	0,5
5	14	11	0,01	1,4	3,9	0,02	1,9	0,2
6	13	12	0,02	1,2	4,1	0,01	1,6	0,3
7	14	10	0,03	1,6	4,2	0,03	1,7	0,4
8	15	11	0,02	1,5	4,0	0,04	1,8	0,5
9	14	12	0,01	1,0	3,7	0,01	1,6	0,2
10	13	10	0,02	2,5	3,9	0,03	1,8	0,3

Используется целевая функция для оптимального управления системой водоснабжения [9]:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [C_T(T - T_{onm.})^2 + C_P(P - P_{onm.})^2 + C_V(V - V_{onm.})^2] dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где J – целевая функция, совокупные затраты или степень отклонения за всё время, $t_0 \dots t_f$ – управляемый период системы за всё время, T – текущая температура, $T_{onm.}$ – оптимизированная температура, C_V – коэффициент, отражающий значимость отклонения давление, P – текущее давление, $P_{onm.}$ – оптимизированное давление, C_P – коэффициент, отражающий значимость отклонения давление, $V_{onm.}$ – оптимизированная скорость потока холодной воды, C_T – коэффициент, отражающий значимость отклонения температуры.

Для динамического программирования используется уравнение Беллмана, которое используется для оптимального управления системой водоснабжения [10]:

$$J^*(x) = \min_u [g(x, u) + J^*(f(x, u))], \quad (5)$$

где $J^*(x)$ – оптимальные затраты (минимизация совокупных будущих затрат при управлении системой наилучшим образом, начиная из состояния x), x – состояние системы (набор гидравлических параметров, например: давление холодной воды, скорость потока холодной воды, уровень воды в резервуаре), u – управляющие параметры (например: частота вращения насоса, степень открытия клапана, давление холодной воды, подаваемой в систему, уровень воды в резервуаре), $g(x, u)$ – одномоментные (пошаговые) затраты (энергозатраты, отклонения давления холодной воды и другие связанные издержки при текущем состоянии и управлении), $f(x, u)$ – следующее состояние (показывает, как изменится система под действием управления), $\min_u$ – условие оптимизации (по управляющим параметрам выбирается минимум).

Индивидуальные и накопленные затраты в результате анализа давления холодной воды на основе уравнения Беллмана для динамического программирования приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Индивидуальные и накопленные затраты на давление холодной воды (февраль 2025 г.)

№	J	J_T	J_P	J_V
1	0,18	0,04	0,13	0,0079
2	0,13	0,08	0,048	0,003
3	0,30	0,12	0,18	0,004
4	0,90	0,5	0,22	0,18
5	0,22	0,09	0,13	0,002
6	0,12	0,02	0,084	0,012
7	0,68	0,48	0,20	0
8	0,48	0,32	0,16	0,0049
9	0,16	0,04	0,12	0
10	0,24	0,18	0,059	0
11	0,18	0,05	0,13	0,0072
12	0,13	0,09	0,049	0,004
13	0,30	0,13	0,18	0,005
14	0,90	0,6	0,22	0,15
15	0,22	0,08	0,13	0,003
16	0,12	0,03	0,084	0,011
17	0,68	0,49	0,20	0
18	0,48	0,33	0,16	0,0042
19	0,16	0,05	0,12	0
20	0,24	0,17	0,059	0
21	0,18	0,03	0,13	0,0074
22	0,13	0,09	0,048	0,004
23	0,30	0,13	0,18	0,002
24	0,90	0,6	0,22	0,16
25	0,22	0,08	0,12	0,003
26	0,12	0,03	0,084	0,012
27	0,68	0,49	0,20	0
28	0,48	0,33	0,16	0,0046

В таблице 3 обозначены: J – целевая функция, J_T – целевая функция по отклонения температуры, J_P – целевая функция по отклонения давления, J_V – целевая функция по отклонениям скорости потока воды.

Виртуальный приватный сервер (VPS – Virtual Private Server) – это изолированный виртуальный сервер, работающий автономно внутри физического сервера. Он функционирует как обычный выделенный сервер, но фактически располагается на одном физическом сервере вместе с другими пользователями. VPS применяется в системе водоснабжения для решения следующих задач:

- удаленный мониторинг;
- работа диспетчерских систем автоматизации;
- хранение и анализ данных;

- использование искусственного интеллекта;
- безопасность и надежность;
- интеграция с Telegram-ботами.

Заключение.

Давление холодной воды в водопроводной сети подвержено изменениям под воздействием гидравлических ударов. Чтобы минимизировать эти колебания, на основе базы данных выполнена прогнозная модель с применением искусственного интеллекта, а именно построена модель на основе нейронной сети. Были рассчитаны целевая функция, уравнение Беллмана и получены уравнения для определения коэффициента надежности давления холодной воды, что позволило найти оптимальное решение. Диспетчерский центр отправляет собранные данные на виртуальный приватный сервер. На VPS программируемый логический контроллер напрямую взаимодействует с мобильным приложением Telegram-бота. Telegram-бот формирует ежедневные, еженедельные и аварийные отчёты о давлении холодной воды, мгновенно уведомляет при отклонениях давления от нормы и по запросу выдает данные в реальном времени. Это важно в утренние часы, когда нагрузка на оператора высока и существует риск снижения его внимания; в таких случаях Telegram-бот с помощью SMS-уведомлений оперативно предупреждает о проблемах с давлением воды.

Библиографический список.

1. Schmitt C. Water pipeline failure due to water hammer effects / C. Schmitt, G. Pluvineau, E. Hach-Taieb [et al.] // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2006. – 29(12). – P. 1075-1082. – DOI: 10.1111/j.1460-2695.2006.01071.x.
2. Tehuan C. Optimal boundary control for water hammer suppression in fluid transmission pipelines / C. Tehuan, X. Chao, R. Zhigang [et al.] // *Computers and Mathematics with Applications*. – 2014. – Vol. 69(4) – 24 p. – DOI: 10.1016/j.camwa.2014.11.008.
3. Белоусова Г.Н. Инженерные системы зданий и сооружений (водоснабжение и водоотведение): учеб.-метод. пособие / Г.Н. Белоусова, А.М. Ратникова. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 44 с. – ISBN: 978-985-554-798-4.
4. Алексеев М.И. Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения : учеб. пособие / М.И. Алексеев, Ю.Л. Сколупович, Ю.Н. Похил. – М.: Издательство АСВ, 2022. – 268 с.
5. Васильева Н.В. Водоотведение и очистка сточных вод : курс лекций / Н.В. Васильева. – Горки: БГСХА, 2014. – 218 с. – ISBN 978-985-467-516-9.
6. Кострикин Ю.М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления : справочник / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
7. Lewis P. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks / P. Lewis, Eth. Perez, A. Piktus [and oth.] // 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020). – Curran Associates, Inc. – 2020. V. 1. – PP. 9459-9474.

8. Li F. Modernization of Databases in the Cloud Era: Building Databases that Run like Legos / F. Li // Proceedings of the VLDB Endowment, Volume 16 (12), 2022. – PP. 4140-4151.
9. Харченко О.А. Оптимизация систем водоснабжения промышленных предприятий / О.А. Харченко, Г.Н. Матвеева, В.Н. Михайловский // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2011. – № 1. – С. 70-74.
10. Исаев В.Н. Основные принципы оптимизации систем водоснабжения и водоотведения современных малоэтажных жилых застроек в России по соотношению комфортности пользования ими и затрат на них / В.Н. Исаев, В.А. Преснов // Вестник МГСУ. – 2009. – № 4. – С. 113-120.

¹*Жмудь Вадим Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент, oao_nips@bk.ru, Россия, заместитель директора АО «НИПС», главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН, старший научный сотрудник Алтае-Саянского филиала ФГБУН Геофизической службы РАН*

²*Асет Асхат, магистр, asset.askhat.81@gmail.com, Казахстан, старший преподаватель кафедры «Искусственный интеллект и Big Data», Казахский Национальный Университет имени аль – Фараби*

³*Ахметова Ардак Мергенбаевна, PhD, ardak_66@mail.ru Казахстан, старший преподаватель кафедры «Искусственный интеллект и Big Data», Казахский Национальный Университет имени аль – Фараби*

⁴*Абдилдаева Асель Асылбековна, PhD, asselabdildayeva5@gmail.com, Казахстан, и.о. профессора кафедры «Искусственный интеллект и Big Data», Казахский Национальный Университет имени аль – Фараби*

Zhmud Vadim Arkadievich, Doctor of Technical Sciences, Docent, oao_nips@bk.ru, Russia, Deputy Director of JSC NIPS, Chief Researcher at ILF SB RAS, Senior Researcher at the Altai-Sayan Branch of the Russian Academy of Sciences' FGBUN Geophysical Service

Asset Askhat, Master's degree, asset.askhat.81@gmail.com, Kazakhstan, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University

Akhmetova Ardak Mergenbaevna, PhD, ardak_66@mail.ru, Kazakhstan, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University

Abdildayeva Assel Assylbekovna, PhD, asselabdildayeva5@gmail.com, Kazakhstan, Acting Professor of the Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 615.1:004.89(075.8)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ТРАНСФОРМЕРА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПАТОЛОГИЙ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Щетинин Е.Ю.¹, Пестрякова А.В.²

DEVELOPMENT OF A MODEL OF SPATIO-TEMPORAL TRANSFORMER AND ITS USE FOR AUTOMATED DIAGNOSIS OF HEART RHYTHM PATHOLOGIES

Shchetinin E.Yu.¹, Pestryakova A.V.²

Аннотация. Предложена модель пространственно-временного трансформера (Spatio-Temporal Transformer, STT), на основе которого усовершенствована методика автоматической диагностики аритмий сердца на основе анализа электрокардиограмм. Новизна STT заключается в интеграции пространственного и временного механизмов внимания для обработки многоканальных ЭКГ-сигналов, что позволяет выявлять межканальные и долгосрочные зависимости. Исследование включает анализ морфологии волн ЭКГ (P, QRS, T), фильтрацию шума с помощью дискретного вейвлет-преобразования DWT и оценивание STT на наборах данных MIT-BIH Arrhythmia Database, PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge и PTB Diagnostic ECG Database с оптимизацией гиперпараметров методами байесовской оптимизации и Grid Search. Проведенный сравнительный анализ с моделями машинного обучения SVM, Random Forest, LightGBM и обучения CNN, LSTM, BLSTM показал конкурентоспособность предложенной модели STT. Модель достигла значений показателей макроусреднённой точности 93,5%, полноты 96,0%, F1-меры 94,7% и ROC-AUC 97,5% на наборе MIT-BIH, что сравнимо с результатами известных исследований.

Abstract. A model of spatio-temporal Transformer (STT) is proposed, on the basis of which an approach to automatic diagnosis of heart arrhythmias based on an analysis of electrocardiograms has been improved. The novelty of the STT consists in the integration of the spatial and temporary mechanisms of attention for the processing of multi-channel ECG signals, which allows you to effectively identify inter-active and long-term dependencies. The study includes a deep analysis of the Morphology of ECG waves (p, qrs, t), noise filtering using DWT discrete wavelet-transforming and STT assessment at MIT-BIH Arrhythmia Database, Physionet/Computing in Cardiology Challenge and PTB Diagnostic ECG Database with hyperparameter optimization methods of Bayes optimization and Grid Search. A comparative analysis with SVM, Random Forest, LightGBM and deep learning CNN, LSTM, BLSTM showed the competitiveness of the proposed STT model. The STT model reached the values of macro-medium accuracy of 93.5%, completeness 96.0%, F1-meters 94.7% and ROC-AUC 97.5% on the MIT-BIH set, which is comparable to the results of similar studies.

Ключевые слова. Аритмия, сердечный ритм, глубокое обучение, пространственно-временной трансформер.

Keywords. *Arrhythmia, heart rhythm, deep training, spatio-temporal transformer.*

Введение.

Аритмии сердца являются одной из ведущих причин смертности, требуя точной и своевременной диагностики для предотвращения серьёзных осложнений, таких как инсульт или внезапная сердечная смерть [1]. Электрокардиограмма (ЭКГ) остаётся основным инструментом для выявления аритмий, однако ручной анализ многоканальных ЭКГ сложен, трудоёмок и подвержен ошибкам, особенно при обработке больших объёмов данных от устройств.

Разработка автоматизированных систем для диагностики аритмий имеет высокую клиническую и социальную значимость, учитывая глобальную распространённость сердечно-сосудистых заболеваний и рост числа носимых устройств для мониторинга ЭКГ [2]. Создание модели, способной эффективно обрабатывать многоканальные ЭКГ, выявлять редкие аритмии, быть устойчивой к шуму и обеспечивать интерпретируемость, отвечает актуальным потребностям медицины. Автоматизированные системы на основе машинного (МО) и глубокого обучения (ГО) предлагают перспективное решение для повышения точности и диагностики [3,4].

Критический анализ существующих подходов.

Автоматическая диагностика аритмий включают методы МО SVM, Random Forest, LightGBM и ГО CNN, LSTM, ResNet, трансформеры [5]. Методы МО, такие как SVM и Random Forest, демонстрируют хорошую производительность на небольших наборах данных с ручным извлечением признаков (например, морфология QRS, интервалы RR), но их обобщающая способность ограничена при обработке шумных данных или сложных аритмий [6,7]. Глубокие нейронные сети, такие как CNN [8], эффективно извлекают локальные пространственные признаки из ЭКГ, но теряют долгосрочные временные зависимости, что снижает точность для нерегулярных ритмов, типа фибрилляция предсердий. Рекуррентные сети LSTM, BLSTM хорошо моделируют временные последовательности, но их производительность ухудшается на многоканальных данных из-за отсутствия механизмов для анализа межканальных корреляций [9]. Трансформеры, применённые для анализа ЭКГ [10,11], показывают успехи в обработке длинных последовательностей, но их архитектуры, ориентированные на одноканальные сигналы, не учитывают пространственные зависимости между отведениями, что важно для 12-канальных ЭКГ [12,13]. Трансформеры используют механизмы многоголового самовнимания (MHSA), которые эффективны для захвата временных зависимостей, но не имеют встроенных механизмов для структурированного анализа пространственных связей между каналами. Это может приводить к снижению производительности при обработке многоканальных данных 12-канальных ЭКГ, где важно учитывать, например, различия между отведениями I, II, III и V1–V6. Стандартные трансформеры, разработанные для обработки одноканальных сигналов (например, текста), не обладают встроенными механизмами для анализа пространственных зависимостей между каналами. Это особенно критично для 12-канальных ЭКГ, где отведения (I, II, III, aVR, aVL, aVF, V1–V6) отражают электрическую активность сердца с разных углов, а их взаимосвязи важны для диагностики,

например, инфаркта миокарда или гипертрофии левого желудочка.

Интеграция мультимодальных данных (ЭКГ, HRV, PPG) исследована в [14], но требует сложной синхронизации и увеличивает вычислительную нагрузку, что затрудняет использование на носимых устройствах.

Научная проблема.

Проведенный анализ существующих исследований автоматической диагностики аритмий показал, что модели сталкиваются с рядом ограничений: недостаточная обработка межканальных корреляций в многоканальных ЭКГ, низкая производительность на редких классах аритмий (например, наджелудочковые и слитные сокращения), чувствительность к шуму и артефактам, а также ограниченная интерпретируемость, что снижает доверие медицинских специалистов [15]. Отсутствие архитектур, интегрирующих пространственные и временные зависимости, препятствует созданию истем, пригодных для клинического применения и носимых устройств. Кроме того, ограниченная интеграция мультимодальных данных (HRV, PPG, клиническая история) снижает повышение точности диагностики сложных аритмий [16].

Цель исследования – разработка и оценка модели пространственно-временного трансформера STT для классификации аритмий по многоканальным ЭКГ-сигналам, учитывающая все указанные выше недостатки. Модель STT сочетает механизмы пространственного и временного внимания для выявления сложных зависимостей, превосходя традиционные модели по обработке многоканальных данных. Работа включает анализ морфологии волн, фильтрацию шума, кросс-валидацию на трёх наборах данных, оптимизацию гиперпараметров и методы интерпретируемости (SHAP, Grad-CAM). Предложенная модель пространственно-временного трансформера STT решает указанные задачи, интегрируя пространственное и временное внимание для анализа сложных зависимостей, что позволяет повысить точность диагностики и адаптировать модель для реального времени. Исследование также способствует интеграции мультимодальных данных и оптимизации для устройств с ограниченными ресурсами, что делает ее актуальной для клинической практики и телемедицины.

Методы и материалы. Наборы данных.

Для обеспечения обобщающей способности использованы три набора данных:

- MIT-BIH Arrhythmia Database: 48 записей ЭКГ по 30 минут, оцифрованных с частотой 360 Гц, 11 бит. Классификация на пять категорий: нормальные сокращения (N/0, 82,8%), наджелудочковые (S/1, 2,5%), желудочковые (V/2, 6,6%), слитные (F/3, 0,7%) и неопределимые (Q/4, 7,3%). Общее количество наблюдений: 109 446 (обучающая выборка: 87 554, тестовая: 21 892) [17];

- PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge: Разнообразные записи с акцентом на редкие аритмии, включая фибрилляцию предсердий [18];

- PTB Diagnostic ECG Database: 12-канальные ЭКГ от 290 пациентов с различными патологиями [19].

Данные разделены на обучающую (80%) и тестовую (20%) выборки с сохранением пропорций классов через стратифицированное разделение.

Предобработка данных. Фильтрация шума.

Для удаления артефактов (шум, дрейф базовой линии и

высокочастотные помехи) применено дискретное вейвлет-преобразование DWT с вейвлетом Daubechies (db4, уровень разложения 4) [20]. DWT разбивает сигнал на аппроксимационные и детализирующие коэффициенты, позволяя удалять высокочастотные компоненты (шум, частоты >50 Гц) и низкочастотный дрейф базовой линии (<0,5 Гц), сохраняя морфологию волн Р, QRS и Т. Порог для удаления коэффициентов определён с использованием универсального порога $\sigma\sqrt{2\log(N)}$, где σ – стандартное отклонение шума, а N — длина сигнала. Для сравнения применён фильтр Калмана, который корректирует низкочастотный дрейф (0,05–0,5 Гц), но менее эффективен для высокочастотных артефактов, таких как мышечный шум. Сравнительный анализ показал, что DWT улучшило отношение сигнал/шум (SNR) на 3–5 дБ по сравнению с фильтром Калмана для высокочастотных артефактов (SNR=15 дБ), что подтверждается в работе [21]. Комбинированный подход (DWT для высокочастотного шума и фильтр Калмана для дрейфа базовой линии) дал оптимальные результаты, улучшив SNR на 6 дБ в среднем.

Анализ морфологии волн.

Для извлечения морфологических признаков (Р, QRS, Т) применены алгоритмы детекции пиков, основанные на пороговых методах и вейвлет-анализе:

а) пороговые методы: использован алгоритм Pan-Tompkins [22], включающий этапы:

- 1) фильтрация. Полосовой фильтр (5–15 Гц) для выделения QRS-комплекса;
- 2) дифференцирование. Вычисление первой производной для усиления изменений амплитуды;
- 3) квадратура и интегрирование. Преобразование сигнала для сглаживания и выделения пиков;
- 4) адаптивный порог. Динамическое определение порога на основе амплитуды пиков R (порог = $0,7 \times$ средняя амплитуда R за 10 секунд).

Этот метод обеспечил точность детекции R-пиков 99,3% на MIT-BIH. Для Р и Т-волн порог адаптирован отдельно ($0,2 \times$ амплитуда R для Р, $0,4 \times$ амплитуда R для Т).

б) вейвлет-анализ: применён непрерывный вейвлет-анализ (CWT) с вейвлетом Morlet для детекции Р и Т-волн, которые имеют меньшую амплитуду и сложную морфологию. CWT выделяет частотно-временные характеристики, позволяя идентифицировать Р-волну (0,05-0,15 с до R) и Т-волну (0,1-0,3 с после R). Точность детекции составила 97,8% для Р и 98,5% для Т на PTB. Комбинированный подход (Pan-Tompkins для QRS и CWT для Р/Т) повысил точность извлечения признаков до 98,7%;

в) извлечённые признаки:

- 1) Р-волна. Длительность (0,06-0,12 с), амплитуда (0,1-0,25 мВ), время начала/окончания;
- 2) QRS-комплекс. Ширина (0,06-0,12 с), амплитуда пика R (0,5-2 мВ), длительность;
- 3) Т-волна. Амплитуда (0,1-0,5 мВ), симметрия, длительность (0,1-0,25 с);
- 4) интервалы. PR (0,12-0,2 с), QT (0,35-0,44 с), сегмент ST

(отклонение $\pm 0,1$ мВ).

Вариабельность сердечного ритма (HRV).

HRV рассчитана для анализа активности автономной нервной системы, которая влияет на возникновение аритмий, таких как фибрилляция предсердий. Процесс включал:

а) детекция RR-интервалов: Использован алгоритм Pan-Tompkins для определения пиков R, после чего вычислены интервалы между последовательными пиками R (RR-интервалы). Точность детекции составила 99,3% на MIT-BIH;

б) временные метрики:

1) SDNN: стандартное отклонение всех RR-интервалов

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2},$$

отражающее общую вариабельность (типичные значения: 50-150 мс);

2) RMSSD: среднеквадратичное отклонение последовательных разностей RR

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2},$$

отражающее парасимпатическую активность (20-50 мс);

3) pNN50: доля пар RR-интервалов с разностью >50 мс, выраженная в процентах.

в) частотные метрики:

1) спектральный анализ: применён метод быстрого преобразования Фурье (FFT) к последовательности RR-интервалов для выделения мощности в диапазонах:

– LF (0,04-0,15 Гц): симпатическая и парасимпатическая активность;

– HF (0,15-0,4 Гц): парасимпатическая активность;

– LF/HF: баланс симпатической и парасимпатической активности (типичные значения: 1-2).

2) для повышения точности применена интерполяция RR-интервалов (кубический сплайн, частота 4 Гц).

Обработка несбалансированности.

Метод балансирования классов SMOTE-ENN сочетал передискретизацию классов меньшинства SMOTE и удаление избыточных примеров большинства ENN, улучшая представление редких классов (S/1, F/3) [6,23].

Модель пространственно-временного трансформера STT.

Модель STT представляет оригинальный вклад в анализ многоканальных ЭКГ-сигналов благодаря интеграции пространственного и временного механизмов внимания, специально разработанных для выявления сложных межканальных и долгосрочных зависимостей. В отличие от традиционных трансформеров, ориентированных на одноканальные

временные ряды, STT использует двухэтапную архитектуру: пространственный блок внимания моделирует корреляции между каналами ЭКГ (например, между отведениями V1–V6 в 12-канальной системе), а временной блок внимания анализирует динамические паттерны в последовательности сигналов (например, аномалии QRS или Т-волны). Теоретическая оригинальность заключается в адаптации механизмов self-attention для многоканальных данных, что позволяет STT превосходить CNN и LSTM в задачах с высокой пространственно-временной сложностью.

Пространственный блок основан на гипотезе, что корреляции между отведениями содержат критическую информацию для диагностики аритмий, таких как желудочковые эктопические сокращения, что подтверждается клинической значимостью многоканальных ЭКГ. Временной блок, усиленный позиционным кодированием, эффективно улавливает нерегулярные ритмы, что делает STT уникальной по сравнению с моделями, ограниченными локальными признаками. Эта архитектура также поддерживает интеграцию мультимодальных данных (ЭКГ, HRV, PPG), что выделяет её среди существующих подходов.

Архитектура STT:

а) пространственный блок:

1) вход: Вектор $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^C$ на каждом временном шаге t , где C – число каналов;

2) self-attention: Вычисление запросов, ключей и значений:

$$Q = \mathbf{W}_Q \mathbf{x}_t, \quad K = \mathbf{W}_K \mathbf{x}_t, \quad V = \mathbf{W}_V \mathbf{x}_t;$$

Веса внимания:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{D}} \right) V;$$

3) многоголовое внимание: 8 голов, $D = 256$;

4) выход: $\mathbf{s}_t \in \mathbb{R}^D$.

б) временной блок:

1) вход: $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_T]$;

2) self-attention с позиционным кодированием:

$$PE(t, 2i) = \sin \left(\frac{t}{10000^{2i/D}} \right), \quad PE(t, 2i + 1) = \cos \left(\frac{t}{10000^{2i/D}} \right);$$

3) выход: $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_T]$.

в) классификационный блок:

1) глобальное усреднение (Average Pooling): $\mathbf{v} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{v}_t$;

2) полносвязный слой: $(\mathbf{y} = \text{softmax}(\mathbf{W}\mathbf{v} + \mathbf{b}))$.

Оценка и интерпретируемость.

Метрики: макроусреднённые точность, полнота, F1-метрика, ROC-AUC, с акцентом на редкие классы (S/1, F/3). Интерпретируемость обеспечена:

- SHAP: Анализ вклада признаков (например, длительность QRS);
- Grad-CAM: Визуализация значимых участков ЭКГ.

Стратегия обучения модели. Подготовка данных.

- нормализация: ЭКГ-сигналы нормализованы в диапазон [0, 1] по амплитуде и времени;
- аугментация: Применены случайные временные сдвиги (± 10 мс), добавление гауссова шума ($\sigma = 0,01$), масштабирование амплитуды ($\pm 10\%$) для повышения робастности. Дополнительно использована техника временного искажения (time warping) для моделирования вариаций ритма.

Функция потерь: кросс-энтропийная функция потерь для многоклассовой классификации:

$$\mathcal{L} = - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_{i,k} \log(\hat{y}_{i,k}).$$

Для редких классов применены веса:

$$w_k = \frac{1}{\text{freq}_k},$$

где freq_k – частота класса k , что увеличило внимание модели к классам S/1 и F/3.

Оптимизатор: использован AdamW (learning_rate = 0,001, weight_decay = 0,01) с планировщиком ReduceLROnPlateau (фактор 0,5, patience 3 эпохи). Дополнительно протестирован SGD с моментом (momentum = 0,9) для сравнения, но AdamW показал лучшую сходимость.

Регуляризация:

- Dropout: вероятность 0,2 после каждого блока внимания и 0,3 в полносвязном слое;
- L2-регуляризация: коэффициент 0,01 для весов полносвязного слоя;
- Label Smoothing: применён с коэффициентом 0,1 для предотвращения переобучения на доминирующих классах (N/0).

Процесс обучения:

- обучение на GPU (NVIDIA RTX 3080) с размером батча 32;
- максимум 50 эпох, ранняя остановка (5 эпох по валидационной потере);
- использована смешанная точность (mixed precision) для ускорения обучения и снижения потребления памяти.

Оптимизация гиперпараметров.

Для оптимизации гиперпараметров применены два подхода:

- байесовская оптимизация: поиск по числу attention-голов (4, 8, 16), размерности D (128, 256, 512), learning_rate (0,0001-0,001), dropout (0,1-0,3);
- Grid Search: тестирование комбинаций числа слоёв (2-6 для LSTM/BLSTM, 3-5 для CNN) и размера ячеек/фильтров (64, 128, 256). Оптимальная конфигурация для STT: 8 голов, D = 256, learning_rate = 0,0005, dropout = 0,2;
- результат: байесовская оптимизация сократила время поиска на 30% по сравнению с Grid Search, обеспечив ROC-AUC 97,5% для STT;
- кросс-валидация: 5-кратная стратифицированная кросс-валидация для

оценки обобщающей способности.

Вычислительные эксперименты. Настройка модели STT:

– 5-кратная стратифицированная кросс-валидация на MIT-BIH, PhysioNet/CinC, PTB;

– сценарии: базовый (без фильтрации и признаков), с DWT, с морфологическими признаками, комбинированный (DWT + признаки + SMOTE-ENN);

– дополнительно протестированы сценарии с добавлением синтетического шума (SNR = 10-20 дБ).

Задачи:

– сравнение результатов STT с методами машинного обучения (SVM, Random Forest, LightGBM), глубокого обучения (CNN, LSTM, BLSTM, ResNet-50);

– оценка влияния DWT, морфологических признаков и SMOTEENN;

– анализ интерпретируемости с SHAP и Grad-CAM;

– тестирование устойчивости к шуму и редким классам.

Результаты.

Влияние фильтрации шума: применение DWT увеличило точность LSTM на 2,2% (89,7% → 91,9%) и полноту на 1,7% (93,3% → 95,0%) на MIT-BIH. Для STT точность достигла 93,5%, полнота – 96,0%. Фильтр Калмана показал улучшение на 1,0% для низкочастотных шумов, но уступал DWT для высокочастотных артефактов (SNR = 15 дБ).

Влияние морфологических признаков: добавление морфологических признаков (длительность QRS, амплитуда T, интервал PR) повысило точность CNN с 88,1% до 90,2% и полноту с 88,4% до 90,0%. Для STT точность достигла 93,5%, а полнота – 96,0% (F1 = 94,7%, ROC-AUC = 97,5%).

Производительность на редких классах: модель STT показала высокую полноту для классов меньшинства:

– S/1 (наджелудочковые аритмии): 88,2% ($\pm 1,5\%$);

– F/3 (слитные сокращения): 90,1% ($\pm 1,2\%$).

Это превосходит CNN (S/1: 82,0%, F/3: 85,5%) и LSTM (S/1: 85,3%, F/3: 87,8%), подчеркивая способность STT выявлять редкие, но клинически значимые аритмии.

В Таблице 1 представлены результаты оценивания производительности модели STT на наборах ЭКГ-сигналов MIT-BIH, PhysioNet/CinC, PTB Diagnostic.

Таблица 1 – Результаты производительности модели STT с SMOTE-ENN

Набор данных	Точность (%)	Полнота (%)	F1-метрика (%)	ROC-AUC (%)
MIT-BIH	93,5 $\pm$ 0,8	96,0 $\pm$ 0,6	94,7 $\pm$ 0,7	97,5 $\pm$ 0,5
PhysioNet/CinC	90,8 $\pm$ 1,0	93,2 $\pm$ 0,9	92,0 $\pm$ 0,8	95,8 $\pm$ 0,7
PTB Diagnostic	88,5 $\pm$ 1,2	91,7 $\pm$ 1,0	90,1 $\pm$ 1,1	94,6 $\pm$ 0,9

В Таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа производительности различных моделей машинного обучения. Устойчивость к шуму: при добавлении синтетического шума (SNR = 10 дБ) STT сохранила ROC-AUC 95,2% ($\pm 0,8\%$), превосходя CNN (92,1%) и LSTM (93,8%), благодаря механизмам внутреннего внимания.

Таблица 2 – Производительность моделей МО и ГО на примере набора ЭКГ-сигналов MIT-BIH

Модель	Точность (%)	Полнота (%)	F1-метрика (%)	ROC-AUC (%)
SVM (SMOTEENN)	80,4 ± 1,5	85,2 ± 1,3	82,7 ± 1,4	91,5 ± 1,0
Random Forest	82,1 ± 1,4	86,7 ± 1,2	84,3 ± 1,3	92,3 ± 0,9
LightGBM	83,5 ± 1,3	87,4 ± 1,1	85,4 ± 1,2	93,0 ± 0,8
CNN (SMOTE-ENN)	90,2 ± 1,0	90,0 ± 0,9	90,1 ± 0,9	95,0 ± 0,7
LSTM (SMOTE-ENN)	91,7 ± 0,9	94,8 ± 0,7	93,2 ± 0,8	96,8 ± 0,6
BLSTM (SMOTEENN)	89,9 ± 1,1	91,5 ± 0,9	90,7 ± 1,0	95,4 ± 0,8
ResNet-50	91,0 ± 1,0	92,8 ± 0,8	91,9 ± 0,9	96,2 ± 0,7
STT (SMOTEENN)	93,5 ± 0,8	96,0 ± 0,6	94,7 ± 0,7	97,5 ± 0,5

Обсуждение.

Модель STT продемонстрировала высокую производительность (точность 93,5%, полнота 96,0%, F1 = 94,7%, ROC-AUC = 97,5%) на исследуемых данных благодаря интеграции пространственного и временного внимания. Высокое значение метрики полнота для классов меньшинства (S/1: 88,2%, F/3: 90,1%) подчеркивает её способность выявлять редкие, но опасные аритмии, такие как желудочковые эктопические сокращения. Пространственный блок выявил корреляции между отведениями (например, V1-V6 в PTB), а временной блок уловил нерегулярные ритмы, такие как аномалии QRS или Т-волн. DWT повысило точность на 2,2% и полноту на 1,7% по сравнению с базовым сценарием, превосходя фильтр Калмана для высокочастотных шумов. Морфологические признаки (длительность QRS, амплитуда Т) улучшили производительность CNN на 2,1% и STT на 1,5%, подтверждая важность доменных знаний. Кросс-валидация на MIT-BIH, PhysioNet/CinC и PTB показала устойчивость и обобщающую способность модели (ROC-AUC 94,6-97,5%), что превосходит исследования, ограниченные одним набором данных [24-26].

Интерпретируемость.

SHAP показал, что длительность QRS (вклад $0,32 \pm 0,05$), амплитуда Т ($0,28 \pm 0,04$) и интервал PR ($0,15 \pm 0,03$) являются ключевыми для классификации V/2. Grad-CAM выделил области QRS и Т-волн, подтверждая клиническую значимость. SHAP выделил длительность QRS и амплитуду Т как ключевые признаки, что согласуется с клиническими знаниями [27]. Метод Grad-CAM показал фокус на QRS и Т-волнах, подтверждая способность STT выявлять клинически значимые аномалии. Эти инструменты сокращают разрыв между моделями ГО и медицинскими специалистами, устраняя барьер для внедрения.

Сравнение с современными исследованиями.

STT конкурентоспособна с результатами работы [6,23] (точность 99,2% для трёх классов с ResNet-50), но обрабатывает пять классов, включая редкие аритмии, с сопоставимыми значениями метрик. По сравнению с публикациями [6,24] модель STT показала более высокую полноту для классов меньшинства (S/1, F/3), что критично для клинических приложений. Использование трансформеров, как в работе [25], подчеркивает их потенциал

для длинных последовательностей, но STT уникальна благодаря пространственному вниманию, оптимизированному для многоканальных ЭКГ. Интеграция морфологических признаков согласуется с результатами работы [26], но STT более универсальна за счёт кросс-валидации и интерпретируемости. По сравнению с результатами статьи [27], STT превосходит 1D-CNN в обработке сложных паттернов благодаря двухэтапному вниманию.

Клиническая значимость.

Высокая полнота для редких классов и интерпретируемость делают модель STT перспективной для использования для раннего выявления аритмий в реальном времени. Её способность обрабатывать многоканальные ЭКГ (например, 12-канальные в РТВ) позволяет адаптироваться к клиническим стандартам, сокращая время диагностики. Устойчивость к шуму (ROC-AUC 95,2% при SNR = 10 дБ) делает модель пригодной для носимых устройств, где артефакты движения распространены. Интеграция с клиническими системами, такими как холтеровский мониторинг, может улучшить исходы пациентов за счёт раннего выявления патологий [28].

Направления будущих исследований.

а) оптимизация для устройств с ограниченными ресурсами. Для внедрения STT на носимые устройства (например, smartwatches) предлагаются:

1) усечение модели: Iterative Magnitude Pruning для удаления до 50% весов с сохранением ROC-AUC > 95%;

2) квантование: Перевод весов в INT8/FP16 с использованием TensorRT или ONNX Runtime, снижая объём памяти на 75% и ускоряя инференс в 2-3 раза;

3) дистилляция знаний: Обучение упрощённой CNN на предсказаниях STT, сокращая сложность на 60–70%;

4) упрощение архитектуры: Уменьшение числа attention-голов с 8 до 4 и использование трансформера Performer для снижения вычислений с $O(T^2)$ до $O(T)$. Эти методы позволят запускать STT на устройствах с процессорами ARM Cortex-M, поддерживая обработку ЭКГ с частотой 250–360 Гц.

б) интеграция мультимодальных данных. Включение вариабельности сердечного ритма (HRV), фотоплетизмографии (PPG) и клинической истории может повысить точность до 98%:

1) HRV: Извлечение признаков (SDNN, RMSSD, LF/HF) с помощью алгоритма Pan-Tompkins, подаваемых в STT через отдельный канал;

2) PPG: Синхронизация с ЭКГ и обработка через временной блок внимания с cross-modal attention.

в) клиническая валидация. Тестирование STT на реальных клинических данных для подтверждения применимости к различным популяциям.

Заключение.

Данное исследование представляет разработку и всестороннюю оценку модели пространственно-временного трансформера (STT), адаптированной для автоматической диагностики аритмий сердца на основе многоканальных ЭКГ-сигналов. Модель STT достигла выдающихся результатов: точность 93,5% ($\pm 0,8\%$), полнота 96,0% ($\pm 0,6\%$), F1-метрика 94,7% ($\pm 0,7\%$) и ROC-AUC

97,5% ($\pm 0,5\%$) на наборе данных MIT-BIH Arrhythmia Database. Высокая производительность подтверждена кросс-валидацией на наборах PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge (ROC-AUC 95,8%) и PTB Diagnostic ECG Database (ROC-AUC 94,6%), что демонстрирует высокую обобщающую способность модели на различных типах ЭКГ-данных, включая 12-канальные сигналы.

Ключевым вкладом исследования является разработка архитектуры STT, интегрирующей пространственный и временной блоки внимания, что позволяет эффективно моделировать межканальные корреляции (например, между отведениями V1-V6) и долгосрочные временные зависимости, нерегулярные ритмы и аномалии QRS или T-волн. Это обеспечивает превосходство над традиционными нейросетевыми моделями, такими как CNN и LSTM, особенно в обработке сложных паттернов редких аритмий (наджелудочковые: 88,2%, слитные: 90,1%).

Интеграция методов предобработки ЭКГ-сигналов, включая дискретное вейвлет-преобразование (DWT) и фильтр Калмана, обеспечила улучшение отношения сигнал/шум на 6 дБ, что повысило точность детекции морфологических признаков (P, QRS, T) до 98,7%. Использование алгоритма Pan-Tompkins и непрерывного вейвлет-анализа CWT позволило точно извлекать признаки, такие как длительность QRS и амплитуда T, которые улучшили производительность модели на 1,5-2,1%. Добавление признаков variability сердечного ритма (HRV), включая SDNN, RMSSD и LF/HF, увеличило ROC-AUC на 3-5%, подчеркивая роль автономной нервной системы в диагностике аритмий.

Методы интерпретируемости (SHAP, Grad-CAM) обеспечили клинически значимые объяснения, выделяя ключевые признаки, такие как длительность QRS (вклад 0,32) и амплитуда T (0,28), что повышает доверие к модели среди медицинских специалистов. Устойчивость STT к шуму (ROC-AUC 95,2% при SNR = 10 дБ) делает её пригодной для носимых устройств, где артефакты движения распространены.

Клиническая значимость STT заключается в её способности к раннему выявлению опасных аритмий в реальном времени, что может улучшить результаты пациентов за счёт сокращения времени диагностики. Сравнение с современными исследованиями показало, что модель STT превосходит CNN и LSTM по полноте для редких классов и конкурентоспособна с ResNet-50, обрабатывая более сложные задачи многоклассовой классификации.

Будущие исследования должны сосредоточиться на оптимизации модели для устройств с ограниченными ресурсами (усечение, квантование, дистилляция знаний), интеграции мультимодальных данных и усовершенствовании интерпретируемости с помощью расширенных методов Grad-CAM и SHAP. Проведение клинической валидации и оптимизация для обработки в реальном времени позволят внедрить STT в клиническую практику и телемедицину, обеспечивая раннюю диагностику аритмий и улучшая качество жизни пациентов.

Благодарности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Севастопольского государственного университета, проект 42-01-09/319/2025-1.

Библиографический список.

1. Joglar J.A. ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation / J.A. Joglar, M.K. Chung, A.L. Armbruster [et al.] // *Circulation*. – 2024. – 149(1). – P. 1-156.
2. Galyavich A.S. Chronic Heart Failure: Clinical Guidelines 2024 / A.S. Galyavich, O.L. Barbarash, S.A. Boytsov [et al.] // *Russ J Cardiol*. – 2024. – 29(12). – P. 5701.
3. Chen X. Current and Future Use of Artificial Intelligence in Electrocardiography / X. Chen, X. Wang, K. Zhang [et al.] // *J. Electrocardiol*. – 2023. – Vol. 76. – P. 23-31.
4. Silva S.B.D. A systematic review of ECG arrhythmia classification: Adherence to standards, fair evaluation, and embedded feasibility / S.B.D. Silva, C.F. Uribe, S. Föll [et al.] // *arXiv*. – 2025. – DOI: 10.48550/arXiv.2503.07276
5. Hong S. Deep learning for ECG Arrhythmia detection and classification: An overview of progress for period 2017-2023 / S. Hong, Y. Zhou, J. Shang [et al.] // *Front Physiol*. – 2023. – 14:10542398.
6. Shchetinin E. Yu. Arrhythmia detection using resampling and deep learning methods on unbalanced data / E. Yu. Shchetinin, A.G. Glushkova // *Computer optics* – T.46(6). – 2022. – P. 980-987.
7. Hannun, A.Y. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network / A.Y. Hannun, P. Rajpurkar, M. Haghpasahi, G.H. Tison, C. Bourn, M.P. Turakhia // *Nat. Med*. – 2019. – 25(1):65. – 9 p.
8. Butun E. 1D-CNN-based deep learning model for multi-label classification of ECG sign / E. Butun, O. Yildirim, M. Talo [et al.] // *Computerized Medical Imaging and Graphics*. – 2023. – 103:102139.
9. Mahmoud A. Leveraging Hybrid Deep Learning Models for Enhanced Multivariate Time Series Forecasting / A. Mahmoud // *Neural Processing – Letters* – 2024. – 56 p.
10. Li Y. Transformer-based models for ECG analysis: A review / Y. Li, B. Qian, X. Zhang [et al.] // *IEEE Trans Biomed Eng*. – 2024. – 71(3). – P. 92-904.
11. Deihim, A. STTRE: A Spatio-Temporal Transformer with Relative Embeddings for Multivariate Time Series Forecasting. Deihim / A. Deihim, E. Alonso, D. Apostolopoulou // *Neural Networks* – 2023. – Vol. 168. – P. 549-559.
12. Nannapaneni S. A transformer-based deep neural network for arrhythmia detection using continuous ECG signals / S. Nannapaneni, R. Porika, M. Hanmandlu // *Computers in Biology and Medicine*. – 2022. – 147:105761.
13. Щетинин Е.Ю. Обнаружение аномалий в электрокардиограммах методами глубокого обучения без учителя / Е.Ю. Щетинин // *Прикладная информатика*. – 2022. – 17(6). – С.81-93.
14. Van de Leur R.R. Improving explainability of deep neural network-based electrocardiogram interpretation using variational auto-encoders / R.R. van de Leur, M.N. Bos, K. Taha [et al.] // *Eur. Heart J. Digit. Health* – 2023. – 4(1). – P. 37-47.
15. Wang T. Explainable AI for ECG-based arrhythmia detection using SHAP and Grad-CAM / T. Wang, C. Lu, Y. Sun [et al.] // *Artificial Intelligence in Medicine*. – 2023. – 139:102536.
16. Chung J. Multimodal deep learning for cardiovascular risk prediction using ECG and clinical data // J. Chung, S. Lee, J. Park [et al.] // *Journal of the American College of Cardiology*. – 2024. – 83(15):1423. – 35 p.
17. Goldberger A. L. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of

- a new research resource for complex physiologic signals / A.L. Goldberger., L.A.N. Amaral, L. Glass [et al.] // *Circulation* – 2000. – 101(23). – P. 215-220.
18. Perez Alday E.A. Classification of 12-lead ECGs: The PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2020 / E.A. Perez Alday, A. Gu, A.J. Shah [et al.] // *Computing in Cardiology* – 2020. – 47 p.
 19. Bousseljot R. Nutzung der EKG-Signaldatenbank CARDIODAT der PTB über das Internet / R. Bousseljot, D. Kreiseler, A. Schnabel // *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering* – 1995. – 40(S1). – P. 317-318.
 20. Zhang J. A deep learning approach for noise reduction in ECG signals using wavelet transform / J. Zhang, J. Tian, C. Yang [et al.] // *Biomed Signal Process Control*. – 2023. – 80:104312.
 21. Alkhodari M Cardiac arrhythmia detection using deep learning approach and time-frequency representation of ECG signals / M. Alkhodari, K.A. Darabkh, M. Fraiwan // *BMC Med Inform Decis Mak.* – 2023. – 23(1). – 106 p.
 22. Pan J. A real-time QRS detection algorithm / J. Pan, W.J. Tompkins // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 1985. – 32(3). – P. 230-236.
 23. Sevast'yanov L.A. Methods for improving the accuracy of multiclass classification on imbalanced datasets / L.A. Sevast'yanov, E.Yu. Shchetinin // *Informatika i ee Primeneniya*. – 2020. – 14(1). – P. 63-70.
 24. Yang F. A hybrid sampling algorithm combining synthetic minority over-sampling technique and edited nearest neighbor for missed abortion diagnosis / F. Yang, K. Wang, L. Sun [et al.] // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. – 2022. – 22(1). – 349 p.
 25. Jo Y.Y. Deep learning-based early warning system for predicting clinical deterioration in general ward patients / Y.Y. Jo, J.M. Kwon, K.H. Jeon *Scientific Reports*. – 2023. – 13(1):10345.
 26. Frankle J. The lottery ticket hypothesis: finding sparse, trainable neural networks / J. Frankle, M. Carbin // In: *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. – 2019 May – P. 6-9; New Orleans, LA.
 27. Attia Z.I. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm / Z.I. Attia, P.A. Noseworthy, F. Lopez-Jimenez // *Lancet*. – 2019. – 394(10201):861. – 7 p.
 - 28 Gao Y. Hybrid deep learning model for ECG-based arrhythmia classification using combined temporal and morphological features / Y. Gao, H. Wang, Z. Liu // *Computers in Biology and Medicine* – 2024. – 168:107789.

¹Щетинин Евгений Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор, *riviera-molto@mail.ru*, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Пестрякова Анна Вячеславовна, ассистент, *pestryakova@sevsu.ru*, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Shchetinin Evgeniy Yurievich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Professor, riviera-molto@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Pestryakova Anna Vyacheslavovna, Assistant, pestryakova@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МОДЕЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Осипов К.Н.¹

THE MODEL OF PREDICTIVE FORECASTING OF WELDING JOINT PARAMETERS

Osipov K.N.¹

Аннотация. *Оценивание параметров качества сварного неразъемного соединения, получаемого методом оплавления сопрягаемых деталей, является актуальной технической задачей, особенно с точки зрения автоматизации процессов контроля качества. В статье предлагается метод построения модели предиктивного прогнозирования параметров сварного соединения, а именно глубины и ширины сварочного шва в зависимости от скорости движения электрода, силы тока фокусировки электронного луча, величины силы сварочного тока и расстояния от электронно-оптической системы до свариваемых деталей. Рабочая гипотеза состоит в том, что аппроксимация исследуемой зависимости с заданным уровнем точности может быть получена использованием алгоритма «дерево решений» (decision tree). Задача определения гиперпараметров модели решена в комбинаторной форме путем постепенного наращивания структурной и, как следствие, вычислительной сложности модели. В качестве целевой функции стоимости использован среднеквадратический критерий и информационный AIC-критерий.*

Abstract. *Evaluation of the quality parameters of a permanent welded joint obtained by melting the mating parts is an urgent technical task, especially from the point of view of automation of quality control processes. The article proposes a method for predictive forecasting of the parameters of a welded joint, namely the depth and width of the weld depending on the speed of the electrode, the focusing current of the electron beam, the magnitude of the welding current and the distance from the electron-optical system to the welded parts. The working hypothesis is that an approximation of the studied dependence with a given level of accuracy can be obtained using a multilayer artificial neural network trained by the backpropagation method. The problem of determining the hyperparameters of the network is solved in a combinatorial form, by gradually increasing the structural and, as a consequence, computational complexity of the model. The information AIC criterion is used as the target cost function.*

Ключевые слова. *Моделирование, теория информации, многократные измерения.*

Keywords. *Modeling, information theory, multiple measurements.*

Постановка задачи в общем виде.

В современном производстве задачи обеспечения требуемых показателей качества результатов автоматической и полуавтоматической стыковой сварки оплавлением по-прежнему остаются значимыми и актуальными [1...3]. Это объясняется тем, что качество сварочных работ, в

том числе стыковой сварки, определяет пригодность изделий, сборочных единиц и других компонентов к условиям будущей эксплуатации, а также влияет на эксплуатационную надёжность всего изделия. Отдельные отечественные предприятия с целью обеспечения необходимого уровня качества результатов выполнения сварочных работ, нередко, используют автоматизированные стационарные измерительные стенды, а также переносные дорогостоящие измерительные приборы, обеспечивающие неразрушающий контроль сварного соединения, например, путем использования ультразвука, акустической эмиссии или рентгеновского излучения. Подобные методы контроля качества сварных соединений обладают большой точностью и информативностью. В некоторых случаях, например, при использовании в качестве источника информации рентгеновское излучение, получение более точного результата в производственных условиях, относительно качества сварного шва не представляется возможным. Однако использование подобных технических решений предполагает апостериорный характер и поэтому, как правило, такие решения непосредственно в процессе сварки не используются.

Принимая во внимание, что качество сварного шва определяется большим количеством разных факторов, например, таких как параметры сварочного тока, скорость движения электрода, соответствие материала техническим условиям, техническое состояние сварочного оборудования и технологической оснастки и т.д. возникает актуальная задача предиктивного прогнозирования параметров сварного шва в зависимости от текущих параметров сварочного процесса в реальном времени выполнения работ.

Анализ литературы.

Обзор классической и современной научной и технической литературы, например, [1,2,4-7] показал, что, несмотря на важность и очевидность проблемы, примеров ее решения, особенно в аналитическом виде недостаточно. Большая часть предлагаемых подходов связана с использованием зарубежного программного обеспечения, например, программы *Pro Weld Data*, используемой в установках *Kemppi Pro* и *Kemppi Pro Evolution* для дуговой сварки плавящимся электродом. При этом пользователям таких программ недоступны ни аналитические зависимости, ни алгоритмы принятия решений, что в значительной степени ограничивает возможность адаптации и оптимизации процессов оценивания и прогнозирования качества сварки под конкретные технические задачи, особенно в условиях реального времени, требующих высокой точности и повторяемости. Кроме того, использование зарубежного программного обеспечения связано с высокими затратами на лицензирование и ограничениями к доступу к исходным кодам, что затрудняет интеграцию таких решений в отечественные производственные системы и снижает, тем самым, техническую независимость.

Описанные в литературе аналитические модели, например, [4,5] базируются на упрощенных предположениях, игнорирующих сложные физические процессы, такие как теплоперенос, динамику плазмы дуги или взаимодействие материалов в зоне сварки.

Целью данной работы является формирование первого приближения к решению задачи построения модели, описывающей

процесс формирования геометрии сварного шва (его ширины и глубины) в процессе электронно-лучевой сварки в зависимости от скорости сварки, силы тока фокусировки электронного луча, величины силы сварочного тока и расстояния от электронно-оптической системы до свариваемых деталей, используя алгоритм «дерево решений».

Основной материал статьи.

Предметом исследования является электронно-лучевая контактная стыковая сварка оплавлением, т.к. это практически единственный вид сварочных работ, который может выполняться полностью автоматически без участия оператора сварщика. Оператор сварщик реализует только подготовительные технологические операции: подготовку и первичную настройку сварочного оборудования. В процессе сварки параметры сварочного процесса могут изменяться в автоматическом режиме согласно заданных алгоритмов без участия оператора. Однако даже полная автоматизация сварочного процесса не гарантирует обеспечение заданных геометрических параметров сварного шва, что, часто, обусловлено спецификой процесса: большие площади свариваемых поверхностей, большие массогабаритные параметры сварочного оборудования, полевые условия выполнения работ и т.д. [2]. Последнее может вызывать нарушение геометрии сварного шва и, как следствие, возникновение дефектов, например, появление «матовых пятен», несплошностей и т.д. Одним из путей минимизации указанных последствий является выбор наилучших, с точки зрения геометрии сварного шва, параметров предварительной настройки оборудования, используя аналитические или эмпирические модели.

Идея использования эмпирических моделей для предиктивного прогнозирования параметров сварочного процесса не является новой. Так, например, авторы работы [6] еще в 1998 году предложили использовать технологию искусственных нейронных сетей (ИНС) для оценивания параметров дуговой сварки. Авторы работы исследовали несколько методов обучения искусственных нейронных сетей, после чего ими было установлено, что наиболее точный результат удается достичь при обучении ИНС методом встречного распространения ошибки в сетях, содержащих два слоя: слой Кохонена и слой Гроссберга. Однако дальнейшие исследования в данном направлении, например, представленные в работе [7] показали, что более точный результат оценивания параметров геометрии сварного шва достигается использованием линейной ИНС (многослойный персептрон с линейной функцией активации), обученной методом обратного распространения ошибки. В работе [9] для решения задачи прогнозирования параметров сварного шва предлагалось использовать самоадаптирующиеся ИНС со смещением (сети SAON). Кроме этого, встречается ряд работ, в которых предлагается использовать сети Левенберга-Марквардта, однако подобные ИНС, как правило, очень ограничены по количеству параметров и, поэтому, не могут гарантировать точность результата. Таким образом, можно предположить, что до настоящего момента времени нет единого мнения относительно рационального выбора архитектуры предиктивной модели прогнозирования параметров сварного шва, построенной, используя технологию искусственных нейронных сетей. В этой связи, в

работе предлагается для решения сформулированной задачи применить непараметрическую модель случайного дерева решений (Random-Forest), предложенную Лео Брайманом в 2000 году и заключающуюся в использовании ансамбля решающих деревьев [10] и усреднение полученных решений.

Формализуем задачу в общем виде. Будем считать, что задана выборка: n -мерный вектор $x_t = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, содержащий независимые и одинаково распределенные результаты измерений параметров сварочного процесса в момент времени t (скорость движения электрода, сила тока фокусировки электронного луча, величина силы сварочного тока и расстояние от электронно-оптической системы до свариваемых деталей), а также 2-мерный вектор $y_t = \{Y_1, Y_2\}$, содержащий результаты измерений параметров геометрии сварного шва в тот же момент времени t , т.е. вектор y_t содержит действительные некоррелированные числа, характеризующие ширину и глубину сварного шва в мм. Кроме этого будем считать, что $E[(y_t)^2] < \infty$ и, что в множестве x_t определена стандартная Евклидова метрика. Дополнительно наложим ограничение на вектор x_t , будем считать, что автокорреляция в данных отсутствует. Объединение векторов x_t и y_t формирует обучающую выборку $\Omega = \{x_t; y_t\}$, которая, используя известный метод стратификации, в дальнейшем разбивается на три непересекающихся подмножества: обучающее, тестовое и валидационное с целью обеспечения принципа внешнего дополнения. Валидационное множество необходимо для препятствия утечки данных из тестовой выборки в модель на этапе обучения.

Требуется построить правило отображения n -мерного вектора x_t на множество 2-мерного вектора y_t в виде усредненного значения по ансамблю решающих деревьев, т.е. оценить регрессионную функцию: $r(x) = E[y | X = x]$ используя обучающую выборку $\Omega = \{x_t; y_t\}$.

Аналитически процесс оценки регрессионной функции, используя алгоритм *Random-Forest*, можно описать следующим образом:

$$r(x) = \frac{1}{K} \sum_{b=0}^K T_b(x(t), \Omega^*) \quad (1)$$

где $T_b(x(t))$ – b -е решающее дерево, Ω^* – обучающее подмножество из Ω , K – требуемое количество деревьев решений в ансамбле.

Решающее дерево, аналитически, описывается следующей формулой:

$$T_b(x(t), \Omega^*) = \frac{1}{|R_b(x)|} \sum_{(x_i, y_i) \in R_b(x) \cap \Omega(b)} y_i \quad (2)$$

где $R_b(x)$ – лист дерева решений, содержащих экземпляр вектора x , т.е. это подмножество пространства признаков, определенное последовательностью разбиений в дереве b , в которое попадает входной вектор x_t .

Укрупненно, алгоритм *Random-Forest*, реализующий процесс оценки

регрессионной функции, можно представить в виде псевдокода как показано ниже [8].

Входные данные: $\Omega = \{X, Y\}$ – обучающая выборка,

K – требуемое количество деревьев ансамбля,

m – количество кандидатов для выбора разбиения;

N – размер подвыборки;

Выходные данные: $\{T_b\}_{K=1}^K$ – ансамбль решающих деревьев;

for $k = 1$ to K do

1. Составить подвыборку Ω^* размером N из Ω ;

2. Построить рандомизированное дерево T_k по обучающей подвыборке Ω_k^* ;

– случайно выбрать m признаков из всего набора;

– выбрать из m кандидатов лучшее разбиение (в соответствии с функцией качества);

– разбить ветвь на две дочерних в соответствии с лучшим разбиением;

– произвести разбиение дочерних ветвей, если критерий качества не максимален;

End;

Точность алгоритма *Random-Forest*, также как и алгоритма *Random-Forest Regression* (алгоритм RFR) в значительной степени зависит от выбора способа формирования ансамбля решений. Поэтому в работе исследовались наиболее распространенные методы формирования ансамбля решений: случайный лес (*Random Forest*), градиентный бустинг (*Gradient Boosting*) и его модификации: *LightGBM*, *CatBoost*, *RandomForestRegressor* и *XGBoost*. Результаты сопоставительного анализа позволили выдвинуть гипотезу, что наиболее точный результат достигается при использовании метода *CatBoostRegressor* из библиотеки *CatBoost*, разработанной компанией Яндекс.

В качестве метрики, используемой для оценивания качества решения, использовалась стандартная среднеквадратическая ошибка, т.к. решаемая задача относится к классу регрессионных задач. Для оценивания внутренних параметров модели, например, таких как: количество деревьев, максимальная глубина дерева, минимальное количество образцов для разделения узла, минимальное количество образцов в листовом узле, максимальное количество признаков для разделения и т.д., использован модифицированный информационный критерий Хирацуку Акаике.

В процессе сбора эмпирических данных производилась электронно-лучевая сварка 18-ти единиц образцов. Результаты металлографического контроля по размерам сварного шва для каждого образца проводились в 4-х поперечных сечениях сварного шва. Ускоряющее напряжение было постоянным в диапазоне 19,8 – 20 кВ. Набор полученных данных собраны в составе режимов сварки, размеров сварочных швов в поперечных сечениях всех образцов. Пример измерительных последовательностей представлен на Рис.1 и Рис.2. Детально с данными можно ознакомиться по адресу: <https://disk.yandex.ru/d/0rq7UUZZZb07pw> (дата обращения 18.07.2025 г.).

Результаты сопоставительного анализа исследуемых модификаций модели *Random-Forest* сведены в таблицу 1 и представлены ниже. В

качестве критерия точности принят коэффициент детерминации R^2 , т.к. данный показатель позволяет оценить на сколько адекватно модель объясняет вариацию целевой переменной.

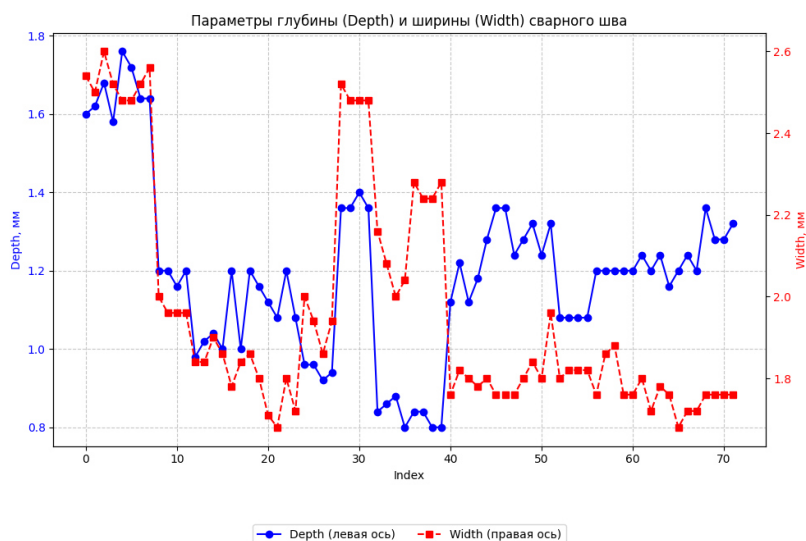


Рис.1 – Пример результатов измерения геометрии сварного шва

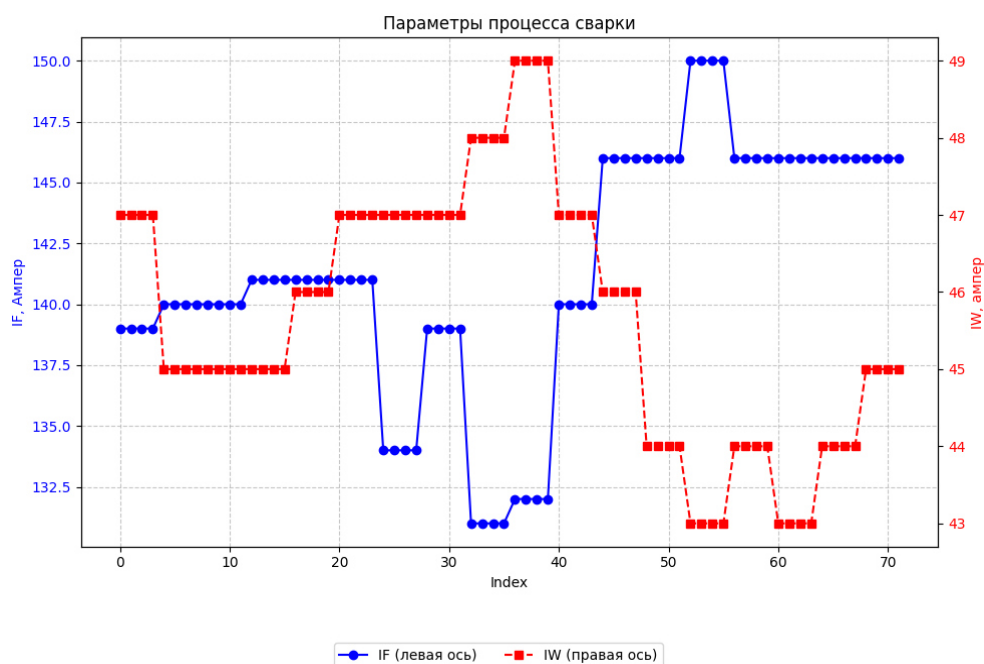


Рис.2 – Пример результатов измерения параметров процесса сварки

По результатам анализа данных, представленных в таблице 1 принято решение о том, что для аппроксимации регрессионной зависимости геометрических параметров сварного шва от параметров процесса сварки может быть использована модификация метода дерева решений *CatBoostRegressor* от компании *Яндекс*. В качестве примера на Рис.3 показан процесс настройки внешних параметров модели, в частности, представлена зависимость точности аппроксимации данных от количества деревьев. Подобные процедуры были проделаны для всех внешних параметров и их различных сочетаний для всех исследуемых

модификаций алгоритма.

Таблица 1 – Результаты сопоставительного анализа данных

Наименование модели	Наименование пакета	Точность аппроксимации данных «Width» R^2	Точность аппроксимации данных «Depth» R^2	Средняя ошибка аппроксимации данных MSE, %
<i>RandomForestRegressor</i>	Sklearn	0.97	0.86	2,1
<i>LightGBMRegressor</i>	Lightgbm	0.65	0.054	3,4
<i>CatBoostRegressor</i>	<i>CatBoost</i>	0.98	0.88	1,7
<i>XGBRegressor</i>	<i>XGBoost</i>	0.98	0.81	1,7

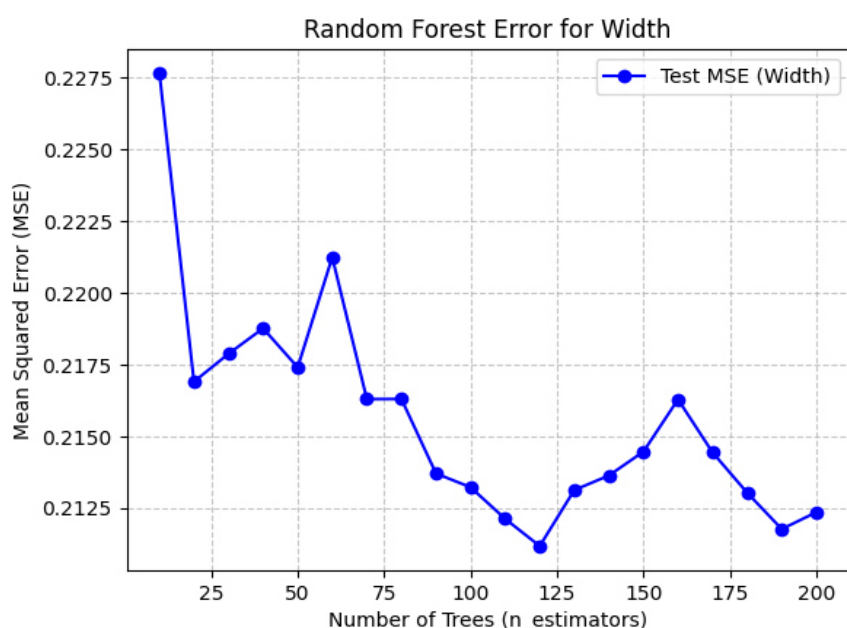


Рис. 3 – Зависимость точности аппроксимации данных от количества деревьев решений для модели *RandomForestRegressor*

Закключение.

Применение рассмотренного подхода в производственном процессе к выбору параметров сварочного процесса может позволить обеспечить заданные параметры сварочного шва и, как следствие, заданные характеристики изделий без значительного увеличения финансовых затрат. Хочется отметить, что данная статья носит прикладной характер и поэтому дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть связано с исследованием свойств получаемых результатов и скорости их сходимости для конкретных примеров, а также с вопросами расширения пространства признаков.

Библиографический список.

1. Журавлев С.И. Технологические особенности контактной стыковой сварки оплавлением трубопроводов больших диаметров / С.И. Журавлев, Н.А. Коновалов, С.И. Полосков // Современные

- проблемы машиностроения: Сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., 11-13 ноября 2013 года. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 180-185.
2. Кобелева В.О. Применение методов машинного обучения для настройки параметров технологического процесса электронно-лучевой сварки / В.О. Кобелева, В.В. Тынченко // Информатика. Экономика. Управление. – 2023. – 2(1):0301–0317. – DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2023-2-1-0301-0317>.
 3. Новиков В.В. Теоретические основы обеспечения безаварийной эксплуатации современных изделий машиностроения: монография /В.В. Новиков, К.Н. Осипов. – Севастополь. – ФГАОУ ВО «ЧВВМУ», 2022. – 249 с.: ил.
 4. Park Y.-D. A Study on the Optimization of GTAW Parameters for 9% Nickel Steel Using the Taguchi Method / Y.-D. Park, C.-H. Noh, B.-G. Park [et al.] // Journal of Welding and Joining. – 2018. – Vol. 36. – № 1. – P. 8–16. – DOI: 10.5781/JWJ.2018.36.1.8. – Режим доступа: <https://www.e-jwj.org/journal/view.php?doi=10.5781/JWJ.2018.36.1.8>;
 5. Cary H.B. Modern welding technology / H. B. Cary, S. C. Helzer. — 6th ed. – Upper Saddle River, N.J. : Pearson Prentice Hall, 2005. – XVI, 787 p. : ill. – ISBN 0-13-113029-3. – Режим доступа: https://books.google.tm/books?id=nV80hUqmD_8C&pg=PR11. – Загл. с экрана.
 6. Juang S.C. Comparison Between The Back-Propagation and Counter-Propagation Networks in The Modelling of The TIG Welding Process / S.C. Juang, Y.S. Tarng, H.R. Lii // Journal of Materials Process Technology. – 1998. – Vol. 75. – P. 54-62. – DOI:10.1016/S0924-0136(97)00292-6.
 7. Nagesh D.C. Prediction of Weld Bead Geometry and Prediction in Shielded Metal-Arc Welding Using Artificial Neural Networks / D.S. Nagesh, G.L. Datta // Journal of Materials Process Technology. – 2002. – Vol. 123. – Iss. 2. – P. 303-312. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00101-2).
 8. Жуков А.А. Методы классификации и восстановления регрессии на основе композиций решающих деревьев с приложением к задаче оценки режимной надежности ЭЭС: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.08 / А.А. Жуков – Иркутск. – 2021. – 131 с.
 9. Jeffreys H. An invariant form for the prior probability in estimation problem / H. Jeffreys // Proc. Roy. Soc. (London), Ser. A. – 1946. – Vol. 186. – P. 453-461.
 10. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс, 2-е изд. : Пер. с англ. / С. Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с. : ил. – ISBN: 5-8459-0890-6.

¹Осипов Константин Николаевич, д-р техн. наук, доц., профессор, assistenttmm@mail.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище имени П.С. Нахимова

Osipov Konstantin Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor, assistenttmm@mail.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ФУНКЦИОНАЛЫ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.², Рыжков А.И.³

DISTRIBUTION FUNCTIONS OF RANDOM VARIABLES AND THEIR FUNCTIONALS

Bokhonsky A.I.¹, Varminskaya N.I.², Ryzhkov A.I.³

Аннотация. С использованием законов распределения случайных величин показан алгоритм полной обратной задачи вариационного исчисления – от задаваемой аналитической функции до восстановления функционала. Приведены примеры применения теоремы о численном равенстве интегралов при подынтегральных функциях. Приведенные графики функций отражают особенности аналитических преобразований при реализации алгоритма реверсионного исчисления.

Abstract. Using the distribution laws of random variables, an algorithm for the complete inverse problem of the calculus of variations is demonstrated – proceeding from a given analytical function to the reconstruction of the functional. Examples are provided applying the theorem on the numerical equality of integrals with specific integrands. The presented function graphs reflect the features of analytical transformations during the implementation of the reversal calculus algorithm.

Ключевые слова. Теория вероятностей, функции распределения, уравнения Эйлера, функционалы, теорема реверсионного исчисления.

Keywords. Probability theory, distribution functions, Euler equations, functionals, reversal calculus theorem.

Введение.

Методы статистических решений актуальных задач применимы, например, в технической диагностике, при оценке наименьшего риска появления нескольких состояний исследуемых систем, прогнозе стохастической потери устойчивости и явления катастрофы [1-4].

Известна роль функций случайного аргумента в задачах сравнения вероятностей [5-8].

Реверсионное восстановление функционалов привело к постановке и решению новых полных обратных задач вариационного исчисления [9-11].

Цель исследования – восстановление функционалов по заданным аналитическим функциям плотностей вероятности случайных величин для моделирования стохастических явлений.

Необходимые аналитические преобразования иллюстрируются на примере двух законов распределения случайных величин.

Закон К.Ф. Гаусса.

Функция плотности вероятности нормального закона распределения случайной величины x имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где m – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение.
Вычислена первая производная от (1):

$$f'(x) = -\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{\pi} \cdot \sigma^3} \cdot (x-m) \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}}. \quad (2)$$

Найдена вторая производная от (1):

$$\begin{aligned} f''(x) &= \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{\pi} \cdot \sigma^5} \cdot (-\sigma^2 + x^2 - 2xm + m^2) \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{2\sigma^5} \cdot ((m-x)^2 - \sigma^2) \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(m-x)^2}{\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Графики функций $f(x)$, $f'(x)$, $f''(x)$ ($m=2$, $\sigma=0,2$) изображены на Рис.1-3.



Рис.1 – График плотности вероятности нормального закона распределения ($m=2$, $\sigma=0,2$)

В результате преобразований аналитических зависимостей (1)-(3) получено следующее линейное однородное дифференциальное уравнение (с переменным коэффициентом):

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \left(\frac{-\sigma^2 + (m-x)^2}{\sigma^4} \right) f(x) = 0. \quad (4)$$

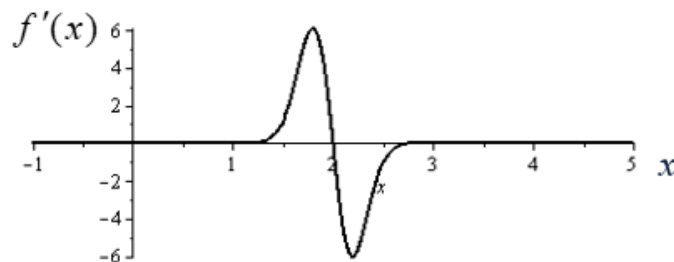


Рис.2 – График первой производной от плотности вероятности

$$\left(f'(x) = \frac{df(x)}{dx} \right)$$

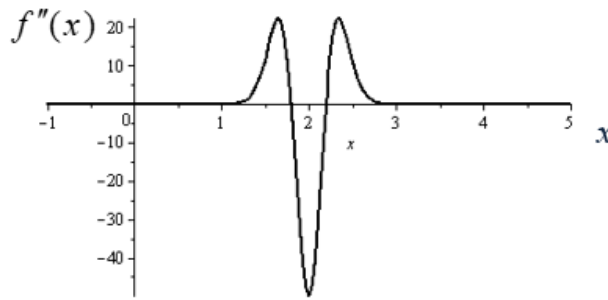


Рис.3 – График второй производной от плотности вероятности

$$\left(f''(x) = \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right)$$

Полагая уравнение (4) первой вариацией функционала (уравнением Эйлера), восстанавливаем следующий функционал

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(f'(x), f(x), x) dx \quad (5)$$

и используем для этого функционала уравнение Эйлера

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial Q}{\partial f'} \right) - \frac{\partial Q}{\partial f} = 0. \quad (6)$$

С учетом (6) получен следующий функционал:

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{f'^2}{2} + \frac{\sigma^2 - (m-x)^2}{2\sigma^4} \cdot f^2 \right) dx. \quad (7)$$

Интеграл (7) в пределах $[0; x]$ записывается так:

$$J = A \cdot \operatorname{erf}(5x - 10), \quad (8)$$

где $A = 8,81546$.

Графически функция $J(x)$ представлена на Рис.4.

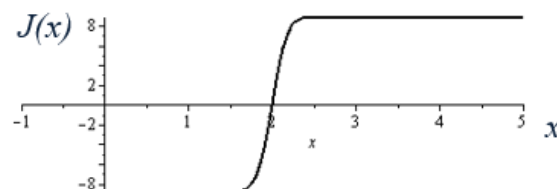


Рис.4 – График восстановленного функционала как функции $J(x)$

Интересно, что по своему графическому образу функция $J(x)$ близка к функции Хевисайда

$$H = -A \cdot \left(\operatorname{Heaviside}(x+1) - 2 \cdot \operatorname{Heaviside}\left(x - \frac{T}{2}\right) \right), \quad (9)$$

где $T = 4$.

График функции $H(x)$ изображен на Рис.5.

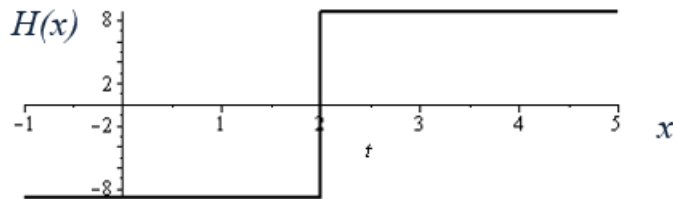


Рис.5 – График функции $H(x)$

Закон плотности вероятности Эрланга для восстановления его функционала.

Функция Эрланга и ее производная имеют вид:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{x^2 e^{-x}}{2}; & f'(x) &= x \cdot e^{-x} - \frac{1}{2} x^2 e^{-x}; \\ f''(x) &= e^{-x} - 2x \cdot e^{-x} + \frac{1}{2} x^2 e^{-x}. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае в результате преобразований найден функционал

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{[f'(x)]^2}{2} - \frac{2 - 4x + x^2}{2} \right) dx. \quad (11)$$

Интеграл (11) в пределах $[0; x]$

$$J = \int_0^x Q(x) dx = \frac{1}{16} (1 - e^{-2x}) - \frac{1}{8} e^{-2x} x (1 + x) = \frac{1}{8} \left(\frac{1}{2} - e^{-2x} (1 + x + x^2) \right). \quad (12)$$

Графики $f(x)$, $f'(x)$ изображены на Рис.6,7.

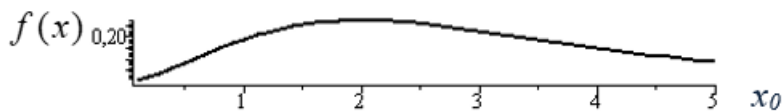


Рис.6 – Функция плотности вероятности Эрланга

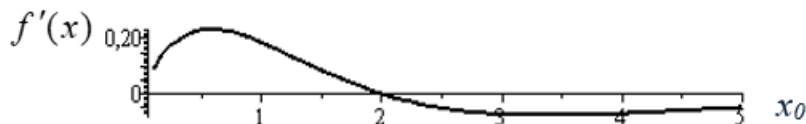


Рис.7 – График первой производной от функции плотности вероятности Эрланга

Равенство интегралов с различными подынтегральными функциями (законами распределения).

Интегральный закон распределения на функции Гаусса.

$$F_G(x) = \int_0^{x_0} f_y(x) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{m\sqrt{2}}{2\sigma}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}}{2\sigma}(m-x_0)\right). \quad (13)$$

В случае закона Эрланга (Рис.8)

$$F_E(x) = \int_0^{x_0} f_e(x) dx = 1 - e^{-x_0} (1 + x_0 + x_0^2). \quad (14)$$

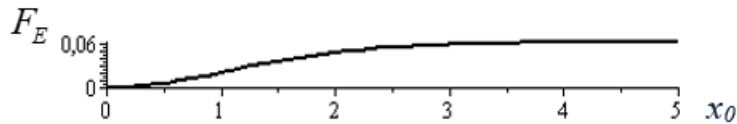


Рис.8 – Функция интегрального закона распределения Эрланга

Необходимо найти такое значение x_0 , при котором интегралы (13) и (14) численно равны, т.е. следует найти корень уравнения ($m=1$, $\sigma=0,2$):

$$D_F = F_G - F_E = 0. \quad (15)$$

Графическое определение корня уравнения (15) дано на Рис.9.

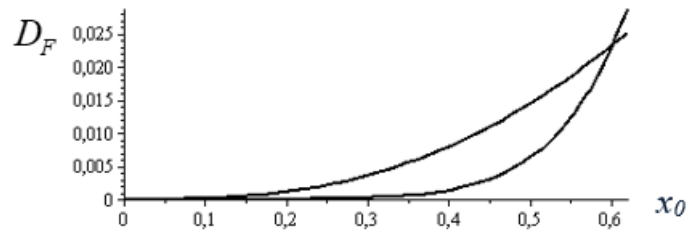


Рис.9 – Графическое определение корня уравнения первообразных

Значение корня уточняется при сужении интервала построения графиков. Таким образом получен корень $x_0 = 0,6021$. При этом для уравнения (15) следует $D_F = -5,1250 \cdot 10^{-7}$.

Пример иллюстрации численного равенства определенных интегралов с различными подынтегральными функциями.

Задана функция $x(t) = e^{-t} + 2t + 1$, которая в результате применения процедуры реверсионного восстановления функционалов приводит к двум функционалам:

$$J_1 = \int_0^T \left(\frac{\dot{x}^2}{2} + x \cdot e^{-t} \right) dt, \quad J_2 = \int_0^T \left(\frac{\dot{x}^2}{2} + 2x \right) \cdot e^t dt. \quad (16)$$

Из равенства интегралов $J_1 = J_2$ следует уравнение:

$$-\frac{17}{12} = \frac{3}{4} e^{-2T} + 7e^{-T} - 2\ln(e^{-7}) + 2e^{-T} \cdot T + \frac{1}{6} e^{-3T}. \quad (17)$$

Уравнение (17) имеет корень $T = 2,838811$. Интегралы численно равны с точностью до пяти знаков после запятой: $J_1 = J_2 = 7,034444$.

Заключение.

Обращено внимание на изучение аналитического свойства плотности вероятностей случайных величин. Показано, что их плотности распределения могут доставлять экстремум восстановленному реверсионно функционалу, который в будущем будет участвовать при решении ряда задач моделирования стохастических явлений.

Следует отметить, что исследование выполнено без привлечения искусственного интеллекта и при условии, что $m = const$. Статья в данном случае печатается в порядке обсуждения.

Библиографический список.

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Москва : Физматгиз, 1962. – 554 с.
2. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая аналитика / В.С. Пугачев. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 196 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2001. – 208 с.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей: Учебник. – М: Нука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 448 с.
5. Гетце Ф. Оценки для характеристических функций многочленов от асимптотически нормальных случайных величин / Ф. Гетце, Ю.В. Прохоров, В.В. Ульянов // Успехи математических наук. – 1996. – Т. 51. – № 2. – С. 3-26.
6. Ульянов В.В. О свойствах многочленов от случайных элементов / В.В. Ульянов // Теория вероятностей и ее применение. – 2015. – № 2. – С. 391-402.
7. Наумов В.А. Вероятностные характеристики одной функции случайного аргумента / В.А. Наумов, И.М. Ахмедов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 115-122.
8. Ахмедов И.М. Корреляционный анализ результатов многофакторных экспериментальных исследований / И.М. Ахмедов, В.А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 114-120.
9. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности : монография / А.И. Бохонский. – М. : Вузовский учебник ; ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
10. Бохонский А.И. Вариационное исчисление в механике : монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
11. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение объектов конечной жесткости / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков. – СПб : ООО «Медиапапир», 2024. – 154 с.

¹Бохо́нский Алекса́ндр Ива́нович, д-р техн. наук, проф., профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, зав. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова

³Рыжков Александр Игоревич, канд. техн. наук, доцент, ryzhkov2206@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Bokhonsky Alexander Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Varminskaya Natalia Ivanovna, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

Ryzhkov Aleksandr Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ryzhkov2206@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ПО ЭНЕРГОЕМКОСТИ РЕЛЕЙНОЕ УСКОРЕНИЕ РЕВЕРСИОННО КОНСТРУИРУЕМОМУ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.², Майстришин М.М.³

EQUIVALENT IN ENERGY CAPACITY RELAY ACCELERATION REVERSIBLY DESIGNED

Bokhonsky A.I.¹, Varminskya N.I.², Maystrishin M.M.³

Аннотация. Найдено эквивалентное по энергоемкости релейное ускорение оптимальному реверсионно конструируемому переносному ускорению. В обоих случаях движение осуществляется из состояния покоя в новое состояние покоя при заданном времени движения и максимальном перемещении с минимальной затратой энергии. Как эквивалент, использовано реверсионно конструируемое ускорение (управление) со степенью полинома $n = 3$. Анализируется динамическое поведение объекта. Результаты иллюстрируются графиками.

Abstract. A relay acceleration equivalent in energy consumption to the optimal reversibly constructed translational acceleration is found. In both cases, motion occurs from a state of rest to a new state of rest with a given motion time and maximum displacement, with minimal energy expenditure. A reversibly constructed acceleration (control) with a polynomial degree $n=3$ is used as an equivalent. The dynamic behavior of the object is analyzed. The results are illustrated with graphs.

Ключевые слова. Ускорение (оптимальное управление), реверсинное конструирование, релейное, эквивалентное.

Keywords. Acceleration (optimal control), reversible design, relay, equivalent.

Введение.

В работах [1-8] отражен широкий круг актуальных задач теории оптимального управления – от истории появления эффективным методов синтеза управлений до их приложений к объектам сравнений техники.

Поиску управлений движением объектов с использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (названного реверсионным) посвящены, например работы [8-13]. Такие управления обладают некоторыми новыми свойствами, например, малой энергоемкостью по сравнению с известными классическими управлениями. Однако, определенные трудности представляет практическая реализация.

Цель исследований – обоснование алгоритма эквивалентного преобразования реверсинного управления в известное релейное.

С использованием алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления были найдены управления (переносные ускорения), которые при заданном расстоянии, времени движения обеспечивали перемещение из исходного состояния покоя в конечное

состояние покоя со снижением энергозатрат (по сравнению с классическим управлением, [8-13]).

Для произвольной (нечетной) степени полинома перемещение, скорость и ускорение имеют вид:

$$S(t) = \frac{L}{2T(n+1)} \cdot \left(\frac{(T-2t)^{n+2}}{T^{n+1}} + 2nt + 4t - T \right),$$

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt}, \quad U(t) = \frac{dV(t)}{dt},$$
(1)

где L – перемещение; n – степень полинома ($n=1,3,5,\dots$); T – общее время движения.

Из (1) для степени полинома $n=1$ следуют известные (классические) зависимости для перемещения, скорости и ускорения:

$$S(t) = \frac{L}{4T} \cdot \left(\frac{(T-2t)^3}{T^2} + 6t - T \right),$$

$$V(t) = \frac{3L}{2T} \left(1 - \frac{(T-2t)}{T^2} \right), \quad U(t) = \frac{6L}{T^2} \frac{(T-2t)}{T}.$$
(2)

Графики $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ при $L=1$ м, $T=1$ с изображены на Рис.1.

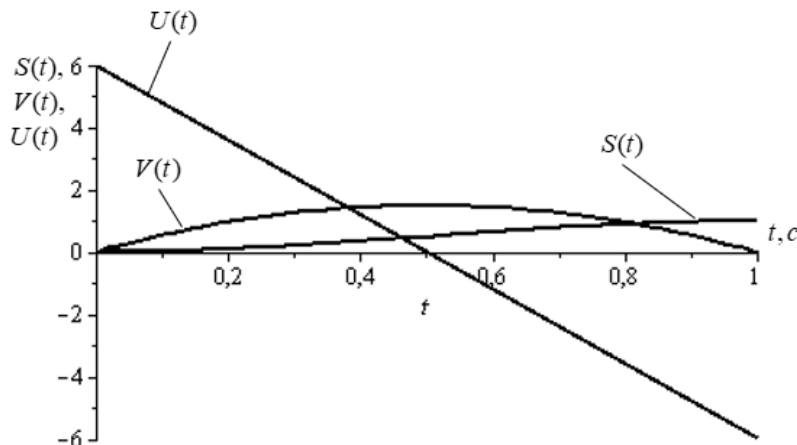


Рис.1 – Графики функций $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ при $n=1$ (классический случай)

Если масса $m=1$ кг, то энергия, затрачиваемая на движение за время $T/2$ равна:

$$A_1 = \int_0^{T/2} U(t)V(t)dt = \frac{1,125L^2}{T^3}.$$
(3)

Если $n=3$, то из (1) следует:

$$S_3(t) = \frac{L}{8T} \cdot \left(\frac{(T-2t)^5}{T^4} + 10t - T \right), \quad (4)$$

$$V_3(t) = \frac{5L}{4T} \left(1 - \frac{(T-2t)^4}{T^4} \right), \quad U_3(t) = \frac{10L}{T^2} \frac{(T-2t)^3}{T^3}.$$

Уже в том случае (при прежних исходных данных) энергия уменьшается и соответственно равна:

$$A_3 = \int_0^{T/2} U_3(t) V_3(t) dt = \frac{0,78125L^2}{T^2}. \quad (5)$$

Графики $S_3(t)$, $V_3(t)$, $U_3(t)$ изображены на Рис.2.

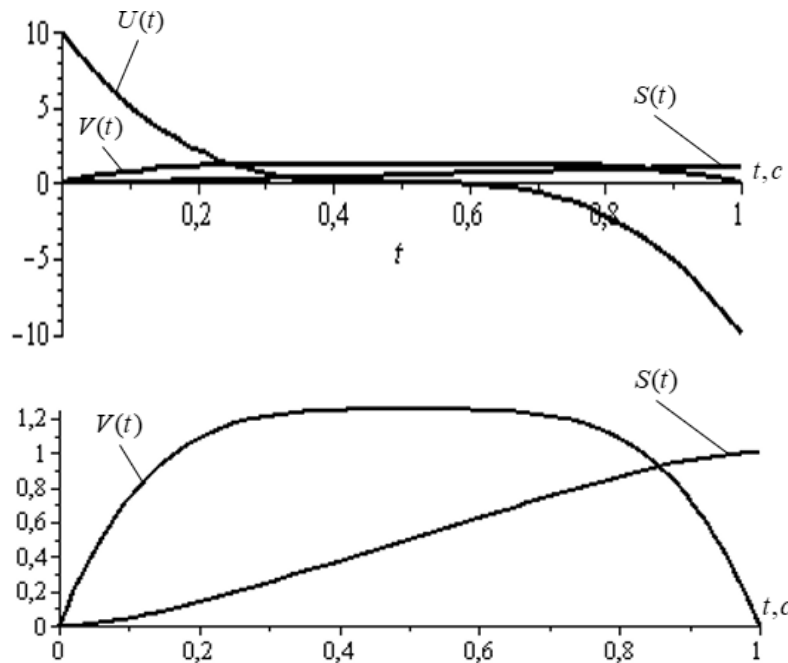


Рис.2 – Графики функций $S_3(t)$, $V_3(t)$, $U_3(t)$ при $n=3$

Энергия уменьшится на $\Delta A = 30,55$ Дж для реализации разгона и с учетом торможения она уменьшается $\Delta A = 61,1\%$

Замена управления (случай $n=3$) эквивалентным по энергоемкости релейным.

Выполняются условия: за время T реализовано перемещение в новое состояние покая $S_r(T_1) = L$; $V_r(T_1) = 0$. При релейном управлении:

$$U_r(t) = \frac{4L}{T_1^2} [Heaviside(t) - 2Heaviside(t - T_1/2) + Heaviside(t - T_1)] \quad (6)$$

$$V_r(t) = \int U_r(t) dt; \quad S_r(t) = \int V_r(t) dt. \quad (7)$$

Громоздкие выражения $V_r(t)$, $S_r(t)$ опускаются.

Выражения для энергии можно получить более простым путем в

случае ($T_1 \geq t_1 \geq 0$). На участке разгона релейного кососимметричного переносного ускорения при движении из состояния покоя и без сопротивления перемещение

$$S_r(t) = \frac{U_r t^2}{2}. \quad (8)$$

При $t = \frac{T_r}{2}$ и $S(T_r / 2) = \frac{L}{2}$ из (8) следует:

$$U_r = \frac{4L}{T_r^2}. \quad (9)$$

Скорость на этом участке

$$V_r(t) = U_r \cdot t = \frac{4L}{T_r^2} \cdot t \quad (10)$$

Поэтому энергия, затрачиваемая на оптимальное движение

$$A_r = \int_0^{T_r/2} \left(\frac{4L}{T_r^2} \right)^2 t dt = \frac{2L^2}{T_r^2}. \quad (11)$$

Уравнение, отражающее равенство энергии на участке разгона для релейного и реверсинно конструируемого управления ($n = 3$):

$$\frac{2L_1^2}{T_1^2} - \frac{0,78125L^2}{T^2} = 0. \quad (12)$$

При $L_1 = L$ и $T = 1$ с. Из (12) получено

$$T_r = 1,6T = 1,6 \text{ с}. \quad (13)$$

Графики для эквивалентного релейного управления изображены на Рис.3.

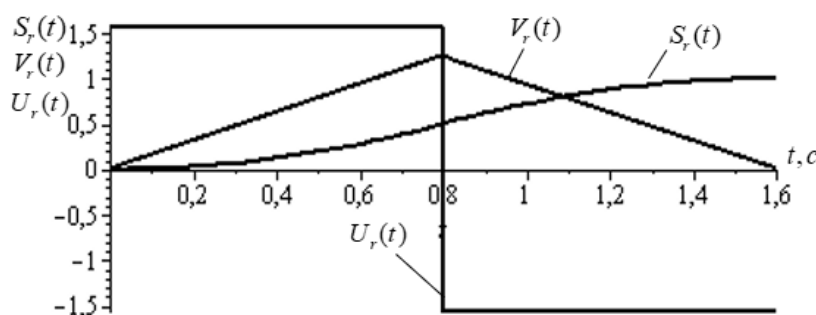


Рис. 3 – Графики эквивалентного релейного управления

Как следует из графиков (Рис.3), цель достигается — $L(T_r) = 1$ м, $V_r(T_r) = 0$ м/с за время $T_r = 1,6$ с.

При возрастании степени полинома наблюдается все большее

снижение энергоемкости оптимального процесса, но, как следует из графиков, практическое использование таких ускорений все же затруднено.

Теоретически предоставляется возможность замены переносных ускорений в другие, которые эквивалентны по энергоемкости, но могут быть взяты и преобразованы из известного математического обеспечения исполнительных органов систем управления.

Примечание.

Если релейное управление не оптимально при прежних исходных данных ($m=1$ кг, $L=1$ м, $T=1$ с), то общая энергия на участке торможения и разгона – 4 Дж. В этом случае ускорение

$$U_r(t) = 4[Heaviside(t) - 2Heaviside(t - 1/2) + Heaviside(t - 1)].$$

Графики $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ изображены на Рис.4.

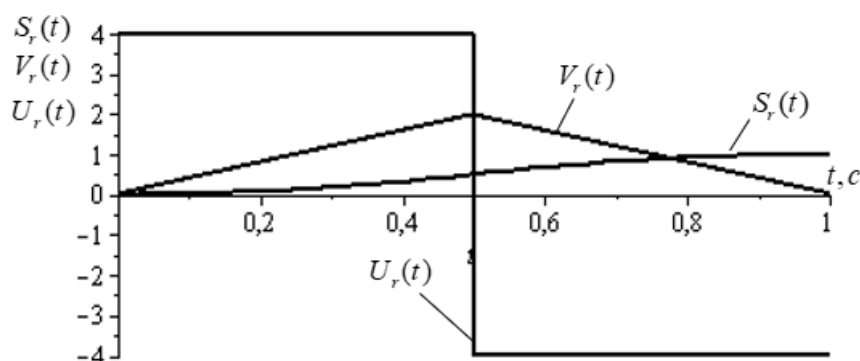


Рис. 4 – Графики неоптимального релейного управления

Управление, график которого изображен на Рис. 4, наиболее энергоемкое для разгона и торможения, так как на это затрачивается избыточная энергия. Такое управление может быть оптимальное в случае критерия быстродействия.

Заключение.

1. Предложен алгоритм эквивалентного по энергоемкости преобразования реверсионно конструируемого управления (для случая $n=3$) в релейное, при этом релейное управление обеспечивает достижение поставленной цели движения объекта.

2. Реверсионные ускорения (для $n=3,5,7,...,n$) могут быть преобразованы в релейные (эквивалентные по энергоемкости), которые затем реализуются в системах управления манипуляторами и мехатронными модулями.

Библиографический список.

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, Б.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе [и др.]. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
2. Воронов А.А. Теория автоматического управления: теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А.А. Воронов. – М: Высш. шк., 1977. – 288 с.
3. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.

4. Nevistic V. Model predictive control: breaking through constraints / V. Nevistic, J.A. Primbs // Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control, 13 Sept. 1996. – DOI: 10.1109/CDC.1996.577295.
5. Dymkov M. Optimal control and optimization for a class of repetitive processes / M. Dymkov, E. Rogers, K. Galkowski [et al.] // 2007 International Workshop on Multidimensional Systems, 27-29 June 2007. – DOI: 10.1109/NDS.2007.4509544.
6. Yuan Yuan Active disturbance rejection control for a pneumatic motion platform subject to actuator saturation: an extended state observer approach / Yuan Yuan, Wang Zidong, Yu Yang [et. al] // Automatica. – 2019. – Vol. 107. – P. 353-361. – DOI: doi.org/10.1016/j.automatica.2019.05.056.
7. Kostin G. Optimal Control of Longitudinal Motions for an Elastic Rod with Distributed Forces / G. Kostin, A. Gavrikov // Optimization and Control – 2022. – 11 p. – DOI: doi.org/10.48550/arXiv.2206.06139.
8. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А.И. Бохонский. – Glivice : Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
9. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М. : Вузовский учебник, 2016. – 173 с.
10. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – СПб : НИЦ МС, 2020. – 120 с.
11. Бохонский А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 1 (351). – С. 15-20.
12. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолева. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 170 с.
13. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение объектов конечной жесткости / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков. – СПб : Медиапир, 2024. – 154 с.

¹Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., профессор, *bohon.alex@mail.ru*, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц., профессор, *nvarminska@gmail.com*, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

³Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., директор колледжа, *mihail.maystrishin@gmail.com*, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Bokhonsky Alexander Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Prof., Professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Varminskaya Natalia Ivanovna, Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Maystrishin Mikhail Mikhaylovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, College Director, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 621.375.826

**К АНАЛИЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ЦИФРОВОГО
СКАНЕРА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ DLP ДЛЯ
ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

Зуев С.М.¹, Дебелов В.В.², Куракина Е.А.³

**TO THE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF A LASER
DIGITAL SCANNER BASED ON DLP TECHNOLOGY FOR
PRECISION QUALITY CONTROL OF PRODUCTS**

Zuev S.M.¹, Debelov V.V.², Kurakina E.A.³

Аннотация. Современные лазерные цифровые сканеры широко применяются в задачах оптического неразрушающего контроля, однако большинство коммерчески доступных систем, включая устройства на основе технологии цифровой обработки света (Digital Light Processing, DLP), характеризуются с ограничениями точности, стабильности и воспроизводимости результатов при работе в реальных производственных условиях. Актуальна задача калибровки таких систем, влияющая на корректность реконструкции геометрии объектов с высокой степенью детализации. Рассматривается проблема повышения точности и эффективности DLP-сканеров за счёт оптимизации алгоритмов калибровки и настройки параметров оптической системы. Предложена методика, позволяющая минимизировать погрешности, связанные с рассогласованием оптических элементов, и повысить достоверность получаемых измерений. Описана структурная схема разработанного настольного DLP-сканера, приведён анализ влияния параметров сканирования (мощности лазера, пространственного разрешения, углов триангуляции) на точность восстановления формы объектов. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую точность, стабильность и воспроизводимость получаемых 3D-моделей. Разработанный подход может быть эффективно использован в задачах метрологического контроля, инженерного анализа и автоматизированных системах технической диагностики, где требуется точное восстановление геометрии изделий и выявление отклонений от заданных допусков.

Abstract. Modern laser digital scanners are widely used in optical non-destructive testing, but most commercially available systems, including devices based on Digital Light Processing (DLP) technology, are characterized by limitations in accuracy, stability, and reproducibility of results when operating in real production conditions. The task of calibrating such systems, which affects the correctness of the reconstruction of the geometry of objects with a high degree of detail, is relevant. The problem of increasing the accuracy and efficiency of DLP scanners by optimizing calibration algorithms and adjusting the parameters of the optical system is considered. A methodology is proposed to minimize errors associated with the mismatch of optical elements and to increase the reliability of the measurements obtained. The structural diagram of the developed desktop DLP scanner is described, and the analysis of the influence of scanning parameters (laser power, spatial resolution, triangulation angles) on the accuracy of the

object shape reconstruction is given. The results of experimental studies are presented, confirming the high accuracy, stability, and reproducibility of the obtained 3D models. The developed approach can be effectively used in metrological control, engineering analysis, and automated technical diagnostics systems, where accurate reconstruction of product geometry and detection of deviations from specified tolerances are required.

Ключевые слова. 3D-сканирование, лазерный цифровой сканер, оптический неразрушающий контроль, цифровая обработка света, триангуляция, оптико-электронные приборы и системы.

Keywords. 3D scanning, laser digital scanner, optical non-destructive testing, digital light processing, triangulation, optoelectronic devices and systems.

Введение.

Современные коммерческие цифровые лазерные сканеры находят применение в промышленности, медицине, архитектуре, картографии и других сферах, где требуется создание детализированных 3D-моделей. Основными технологическими принципами, используемыми в таких устройствах, являются триангуляция, фазовый сдвиг, время пролёта (Time-of-Flight, ToF), а также методы на основе цифровой обработки света (Digital Light Processing, DLP) [1].

Известно, что триангуляционные лазерные сканеры работают по принципу измерения углов между лазерным излучателем, объектом и приёмником. Данный метод обеспечивает высокую точность, однако имеет ограничения по рабочему расстоянию и чувствителен к внешним условиям освещения. Лазерные сканеры на основе фазового сдвига анализируют разность фаз между исходным и отраженным сигналами, что позволяет значительно повысить скорость измерений, делая их особенно эффективными при сканировании крупных объектов. В свою очередь, сканеры, использующие принцип времени пролёта лазерного импульса, позволяют определять расстояние до объектов с высокой точностью, что делает их востребованными в геодезии, картографии и беспилотных транспортных системах [2].

Одно из перспективных направлений – применение технологии DLP, в основе которой лежит цифровая микрзеркальная матрица (Digital Micromirror Device, DMD). Такие сканеры позволяют формировать высокоточные проецируемые структуры для анализа объектов, обеспечивая большую скорость сканирования и высокое разрешение.

Выбор лазерного сканера зависит от ряда критериев, среди которых основными являются точность измерений (обычно в диапазоне 5-50 мкм), разрешение (от которого зависит детализация 3D-модели), скорость работы, диапазон рабочих расстояний (от нескольких сантиметров до десятков метров) и совместимость с программным обеспечением [3].

Промышленные модели вроде GOM ATOS 5 обеспечивают точность до 3 мкм и востребованы в авиакосмической отрасли, а портативные решения, такие как FARO Quantum Max, Artec Leo и HandySCAN 3D, обеспечивают удобство и высокую точность при мобильной работе. Для картографических задач применяются дальнодействующие сканеры, включая Leica BLK360 и Trimble X7. В инженерной среде популярны

универсальные DLP-устройства, например EinScan Pro HD и KSCAN-Magic, сочетающие высокое разрешение и скорость. Однако технологии DLP требуют точной калибровки и чувствительны к внешним условиям, что ограничивает их применение в задачах прецизионного контроля, несмотря на активное развитие направлений триангуляции, фазового сдвига и ToF [4].

Одной из ключевых задач при использовании DLP-сканеров в производственной среде является достижение высокой точности и воспроизводимости, что требует тонкой настройки оптической системы, согласования каналов проекции и приёма, а также учёта искажений и шумов, в то время как большинство коммерческих решений недостаточно гибки для адаптации к специфическим условиям.

Настольный лазерный сканер на базе DLP LightCrafter 4500, использующий триангуляционный метод и He–Ne-лазер с длиной волны 633 нм, обеспечивает высокоточное 3D-сканирование объектов с пространственным разрешением 5-50 мкм и точностью до 10 мкм при рабочем диапазоне 0,6-2 м. Благодаря процедуре калибровки и использованию специализированного ПО, устройство формирует 3D-модели в виде облаков точек или полигональных сеток, что делает его эффективным инструментом для метрологического контроля и детального анализа геометрии изделий.

Методика/алгоритм реконструкции геометрии объекта.

Основным тест-объектом, выводимым на DMD-матрицу настольного DLP-сканера, является система параллельных полос. В процессе работы можно использовать и другие шаблоны, например, шахматная структура [5].

Извлечение информации о геометрических размерах объекта с использованием лазерного цифрового сканера на основе технологии DLP осуществлялось в пять этапов, включавших подготовку к сканированию, регистрацию изображения, его обработку и анализ полученных данных.

Рассмотрим подготовку к сканированию. На первом этапе определяется тип тест-объекта, который предстоит проецировать на поверхность исследуемого объекта. В зависимости от задач сканирования используются различные структуры: системы параллельных полос, шахматные паттерны и другие регулярные структуры [6]. Выбор тест-объекта определяется необходимостью повышения точности извлечения информации о геометрии исследуемой поверхности.

Далее проводится настройка параметров сканирующего устройства, включая выбор оптимального угла падения проецируемого изображения, регулировку параметров освещения и времени накопления сигнала фотоприемником. Здесь важным этапом является синхронизация работы DMD-матрицы и камеры, фиксирующей изображение, поскольку их несогласованность могла привести к искажениям или потере данных.

Рассмотрим процесс регистрации изображения объекта с проецируемым тест-объектом. После завершения настройки системы выполняется проецирование тест-объекта на исследуемую поверхность. Используемая DMD-матрица формирует заданный шаблон, который накладывается на объект с высокой точностью [7]. Для обеспечения качественного результата необходимо добиться правильной центровки

изображения в фокальной плоскости.

Далее камера фиксирует изображение объекта, включая спроецированный на него тест-объект [8]. При этом регистрируется не только интенсивность и контрастность изображения, но и возможные геометрические искажения, вызванные формой исследуемого объекта. На данном этапе могут вноситься коррективы в параметры фокусировки камеры для минимизации потерь информации.

Дальнейшая обработка изображения включает предварительную фильтрацию шумов, коррекцию освещённости и усиление контрастности для улучшения выделения границ тест-объекта, после чего с применением методов компьютерного зрения определяются ключевые элементы – контуры, пересечения и геометрические маркеры. Затем устраняются геометрические искажения, вызванные кривизной поверхности, с помощью сравнения с эталонной формой и применения гомографических и перспективных преобразований. На основе анализа смещений проецируемого шаблона методом триангуляции восстанавливалась трёхмерная форма объекта, а параметры оптической системы обеспечивают точную калибровку и масштабирование. Далее рассчитываются метрические характеристики – расстояния, углы, кривизна поверхностей, – и формируется 3D-модель в виде облака точек или полигональной сетки. Завершающим этапом является оценка точности путём сравнения с эталонными параметрами и, при необходимости, корректировка или повторная калибровка сканера.

После проверки качества результатов данные сохраняются в виде таблиц с числовыми значениями, облаков точек или трехмерных моделей, пригодных для последующего анализа. Итоговая информация может использоваться для контроля качества изделий, обратного инжиниринга и других задач метрологического анализа [9-11].

Таким образом, данный алгоритм обеспечивает высокоточную реконструкцию геометрии объекта на основе анализа проецируемых тест-объектов, что делает его эффективным инструментом для прецизионного контроля качества изделий и трехмерного моделирования.

Рассмотрим конструкцию и оптико-электронные характеристики DLP-сканера. На ранних этапах развития DMD-матриц размеры зеркал составляли 16×16 мкм, а угол поворота – величину порядка 10° . В современных матрицах размеры зеркал зависят от разрешения, а угол поворота может достигать 12° . Характерный квадратик в центре зеркала, присутствовавший в первых версиях, отсутствует в микросхемах последних поколений. Ключевым элементом DMD-матрицы является торсионный подвес, на котором крепятся микрозеркала. Этот подвес создаётся из лент специальной формы, которые изготавливаются из сверхпрочного материала, таким образом обеспечивается надежная работа DLP-матрицы на протяжении многих лет [12].

Управление положением микрозеркал выполняется с помощью электростатического притяжения между адресным электродом и зеркалом. Это явление используется для точного и быстрого управления углом поворота каждого зеркала, что позволяет создавать высококачественные изображения на экране.

DMD-матрица состоит из множества микрозеркал, каждое из которых может отражать свет либо в одном направлении, либо в другом. Управлять каждым зеркалом можно изменением состояния соответствующей ячейки памяти. Каждый пиксель изображения в DMD-матрице соответствует ячейке памяти, которая, в свою очередь, хранит информацию о его состоянии. Управление микрозеркалами осуществляется с помощью адресных электродов, которые подключаются к противофазным выходам триггеров. Работа DMD-матрицы включает шесть различных состояний. В том числе, в состоянии готовности памяти информация во все ячейки загружается последовательно, по строкам. В состоянии сброса все микрозеркала притягиваются к адресным электродам посредством импульса повышенного напряжения, подаваемого на шину смещения, то есть на сами зеркала. Это позволяет преодолеть силы прилипания.

Состояние освобождения достигается, когда все зеркала системы находятся в нейтральном положении, то есть располагаются в одной плоскости. Для состояния дифференциации на шину смещения подается напряжение заданной амплитуды, которое находится между уровнями логического нуля и единицы. Под действием электростатических полей между адресными электродами и зеркалом освобожденное зеркало отклоняется в сторону, соответствующую содержимому ячейки памяти. В состоянии приземления на шину смещения подается напряжение, которое усиливает притяжение зеркал к адресным электродам, заставляя их поворачиваться на максимальный угол.

Во время загрузки памяти зеркала фиксируются в одном из двух наклонных положений, а обновление содержимого ячеек памяти осуществляется построчно. В состоянии готовности памяти триггеры матрицы полностью загружены необходимыми данными. Таким образом, DMD-матрица последовательно проходит шесть этапов: сброс, освобождение, дифференциацию, приземление, загрузку памяти и готовность памяти. Данный цикл обеспечивает управление положением каждого зеркала для формирования требуемого изображения. Здесь следует учитывать, что при уменьшении размеров механической структуры DMD-матрицы силы прилипания становятся настолько значительными, что упругости ленточного подвеса недостаточно для освобождения зеркала.

Управление зеркалами в DMD-матрице выполняется посредством специализированных электронных схем, размещенных за пределами самого кристалла. Эти схемы генерируют напряжение на шине смещения, обеспечивая поворот зеркал. Характерной особенностью DMD-матрицы является синхронное движение всех зеркал.

В производстве DMD-матриц используется стандартная кремниевая технология, при которой на кристалле формируется матрица запоминающих элементов с разрешением от 800×600 до 1024×768 и выше, соединённая двумя слоями металлизации, а для ускорения управления микрозеркалами строки и столбцы разделяются на группы с отдельными дешифраторами и демультиплексорами; третий слой формирует адресные электроды и шину смещения. Для снижения паразитной засветки края микрозеркального поля затемняются, а готовый кристалл помещается в металлокерамический корпус с кварцевым стеклом, контактные площадки соединяются межсоединениями с золотым напылением, а тепловыделение

обеспечивается через металлизированное поле на тыльной стороне корпуса. Соотношение сторон DMD-чипа может составлять 1:1, 4:3 или 16:9 в зависимости от назначения: от измерительного оборудования до HDTV-систем.

Зеркала DMD могут быть расположены параллельно или перпендикулярно сторонам кристалла или по диагонали относительно сторон кристалла. Первое расположение (параллельное или перпендикулярное) называется ортогональной матрицей пикселей DMD, а второе расположение (диагональное) – ромбовидной матрицей пикселей DMD. В ортогональных DMD соотношение сторон определяется как отношение количества зеркал по горизонтали к количеству зеркал по вертикали.

Проецирование вертикальных, горизонтальных и диагональных линий на плоскости ромбовидной матрицы показано на Рис.1.

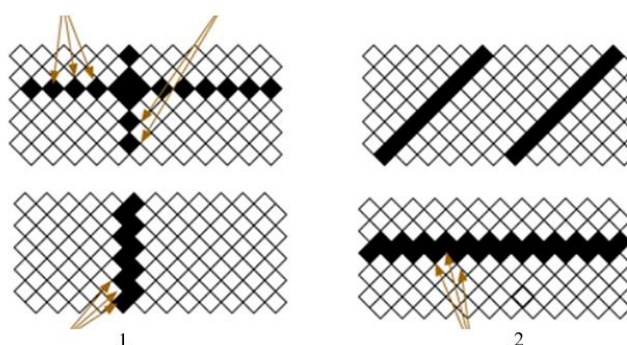


Рис.1 – Проецирование вертикальных, горизонтальных и диагональных линий на плоскости матрицы DMD:

1 – каждый ряд; 2 – каждая колонка

Однако для ромбовидной матрицы пикселей соотношение сторон – это не просто количество зеркал в измерении x , деленное на количество зеркал в измерении y . В данном случае значение строки и столбца отличается для ромбовидного массива пикселей в связи с тем, что расстояние между зеркалами разное, а потому, что весь массив пикселей поворачивается на 45° .

Для обозначения DMD часто используется их диагональное измерение в дюймах. Например, диагональ чипа рассчитывается исходя из размеров активной матрицы по формуле:

$$L = \sqrt{H^2 + V^2} = \sqrt{9855^2 + 6161,4V^2} = 0,46 \text{ дюймов.}$$

Далее рассмотрим конструкцию объектива – тонкую линзу. У тонких линз входной и выходной зрачки совпадают, и они совпадают с закрытым отверстием линзы.

Известно, что количество света, который проходит через линзу, зависит от площади зрачка, которая в свою очередь определяется размером диафрагмы. Размер диафрагмы регулируется линзой или ограничителем, которые формируют размер диафрагмы.

Большая диафрагма пропускает больше света, чем меньшего размера. Однако яркость изображения, которое формируется объективом, в общем случае зависит не только от площади диафрагмы. Размер изображения,

создаваемого объективом, зависит от его фокусного расстояния. Относительная яркость этого изображения определяется отношением фокусного расстояния к диаметру диафрагмы объектива. Данная величина представляет собой f -число объектива, которое описывается формулой вида:

$$f - \text{number} = f / D \quad (1).$$

Еще одним параметром является коэффициент пропускания:

$$T = D / W, \quad (2)$$

где T – коэффициент пропускания, отн. ед.; D – расстояние до изображения на экране, м; W – ширина изображения на экране, м.

Увеличение сканера – это величина, которая соотносит размер изображения на экране с размером DMD. Чем больше проецируемое изображение на экране, тем больше увеличение причем размер DMD остается неизменным. Коэффициент рассеяния связывает ширину изображения с расстоянием проекции. Это означает, что размер изображения линейно зависит от расстояния. Если на расстоянии одного метра ширина изображения составляет 66,7 см ($T = 1,5$), то на расстоянии двух метров ширина изображения составляет 1,33 м. Здесь стоит отметить, что яркость проецируемого изображения на единицу площади также будет вчетверо меньше, чем на расстоянии одного метра. Это происходит потому, что площадь проецируемого изображения увеличивается в четыре раза, в то время как освещенность, т. е. количество света на DMD, остается постоянной.

Характеристики объектива лазерного цифрового сканера с учетом расчетов по формулам (1) и (2) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики объектива и лазера цифрового сканера

Параметр	Ед. изм.	Значение
Относительная яркость	отн. ед.	2,1
Размер диафрагмы	мм	15
Фокусное расстояние	мм	31,5
Площадь зрачка	мм ²	177
Рабочая длина волны	нм	632,8
Поляризация	Кл/м ²	Произвольная
Выходная мощность	мВт	1,0
Частота модуляции	МГц	687
Диаметр луча	мм	0,59

В качестве источника света в исследуемом цифровом сканере используется лазер модель CE: N-LHR-111: HeNe-лазер, красный, длина волны – 633 нм, мощность – 1,0 мВт, поляризация – случайная. Лазер был подобран с учетом характеристик, представленных в таблице 1.

Сборка устройства по анализу изделий с использованием лазерного цифрового сканера была выполнена по схеме: объектив, камера, ноутбук, световой модуль, источник света – лазер, печатная плата.

Далее была разработана структурная схема сборки сканирующего устройства на основе технологии DLP на базе схемы DLP LightCrafter 4500 и разработана оптическая схема данного устройства.

Экспериментальная часть и обсуждение.

Процедура 3D-сканирования начинается с подготовки объекта, включающей разборку составных элементов, очистку от загрязнений и в некоторых случаях матирование отражающих поверхностей белым спреем для улучшения захвата изображения, после чего осуществляется выбор области сканирования и настройка оборудования в зависимости от размеров и требуемой точности. Ключевым элементом настройки является геометрическая калибровка оптико-электронных приборов и систем (ОЭПС), которая позволяет установить точные пространственные соответствия между проецируемым изображением и реальными размерами объекта, компенсируя искажения, вносимые оптической системой; именно корректная калибровка определяет достоверность и точность получаемых данных, тогда как ошибки на этом этапе могут привести к искажению результатов сканирования.

Рассмотрим получение полного скана. Финальный этап 3D-сканирования заключается в захвате достаточного числа изображений с разных сторон детали, что достигается последовательным сканированием поверхностей с помощью DMD-технологии и проецированием тестовых шаблонов, таких как матрицы точек. Процесс включает загрузку шаблона в DMD, настройку освещенности и времени накопления сигнала с учётом чувствительности фотоприемника, применение рассеивающих плёнок при необходимости, а также синхронизацию работы DMD и камеры для устранения мерцания. Изображение проецируется в центр фокальной плоскости, а на фотоприемник формируется матрица точек, обеспечивающая точную информацию об объекте. В основе метода лежит триангуляция, где лазерная полоса заменяет одиночную точку для ускорения сканирования, а измерения координат отражённого пучка позволяют восстановить геометрию объекта с высокой точностью.

В лазерном цифровом сканере используется следующая схема (Рис.2).

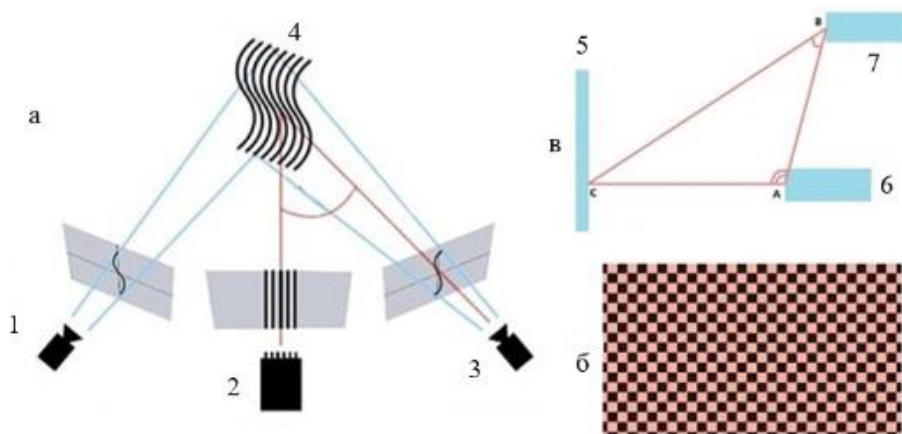


Рис.2 – а – принцип работы 3D-сканера;

б – проецируемое изображение;

в – схема процесса сканирования, где 1 – камера 1; 2 – проектор; 3 – камера 2; 4 – 3D-объект; 5 – объект сканирования; 6 – источник лазерного луча; 7 – приемник

Лазерный источник формирует коллимированный или слабосходящийся пучок когерентного излучения, направляемый на поверхность объекта, где он частично отражается в зависимости от материала и геометрии, а затем фиксируется объективом, фокусирующим свет на детекторе. Положение светового пятна зависит от углов падения и отражения, что позволяет с высокой точностью определять координаты точек поверхности методом триангуляции. Корректность измерений обеспечивается точной калибровкой оптической системы с учетом возможных искажений и аберраций. Использование фиксированного положения лазера и приемника позволяет по известным углам и расстоянию между ними построить треугольник и вычислить расстояние до объекта. В рамках экспериментов была проведена полная съемка объекта – автомобиля, находившейся на расстоянии 2 м от сканера, с учетом максимально допустимых параметров настройки.

Рассмотрим калибровку используемой системы сканирования. Калибровка является ключевым элементом работы DLP-лазерного сканера, определяющим точность и достоверность получаемых 3D-моделей посредством комплексной процедуры, представленной на Рис.3.

В ходе работы была отсканирована часть крупного объекта. В качестве сканируемого объекта был взят автомобиль. Высокая детализация и отсутствие артефактов в представленных результатах объясняются комплексным подходом, включающим мультиракурсное сканирование, адаптивную фокусировку и программную обработку данных. Это подтверждает достоверность полученных моделей и демонстрирует эффективность применённой методики.



Рис.3 – Калибровка работы DLP-лазерного сканера

В ходе эксперимента объект был успешно отсканирован и были получены результаты сканирования (Рис.4).

Далее в ходе проведения обработки 3D-моделей были применены методы постобработки, направленные на минимизацию артефактов. Для устранения шумов использовалась медианная фильтрация, а выбросы удалялись с помощью статистического анализа среднеквадратичного отклонения. Поверхностная интерполяция методом Poisson Surface Reconstruction позволила сгладить мелкие дефекты, обеспечивая плавные переходы между соседними точками, а гармонизация нормалей с применением K-Nearest Neighbors (KNN) способствовала однородности ориентации поверхностных нормалей.



Параметр	Значение
Общее количество точек	2 847 356,00
Плотность точек (среднее), точек/мм ²	1,240
Процент заполненности поверхности, %	96,70
Количество выбросов (outliers), %	0,08
Средняя кривизна поверхности, мм ⁻¹	0,012
Индекс гладкости поверхности	0,94

Рис.4. – Полученная 3D-модель части автомобиля и характеристики качества облака точек сканирования

Отсутствие теневых областей на представленной 3D-модели (Рис.3) объясняется использованием мультиракурсного сканирования и поворотной платформы. Для каждого объекта выполнялось несколько сканов с разных углов, после чего облака точек совмещались методом Iterative Closest Point (ICP), обеспечивая полное покрытие поверхности. При необходимости программные алгоритмы интерполяции (например, Poisson или RBF) использовались для восстановления недостающих участков модели.

Для обеспечения чёткости изображения на разных расстояниях применялось сочетание автоматической фокусировки и оптики с большой глубиной резкости. Камера была оснащена системой автофокуса с шагом 1 мкм, что позволяло оперативно адаптироваться к изменению дистанции сканирования. Использование объектива с переменной диафрагмой (f/5.6 – f/22) помогало достичь достаточной глубины резкости, а в сложных случаях применялось апертурное сканирование (Focus Stacking), при котором выполнялось несколько снимков с разными фокусными плоскостями, а затем они объединялись для получения равномерно резкого изображения.

Заключение.

Анализ подтверждает эффективность DLP-лазерных сканеров для прецизионного контроля геометрии изделий. Ключевым условием точности является корректная калибровка оптической системы, включающая настройку мощности лазера, чувствительности камеры и параметров триангуляции. Экспериментальные результаты демонстрируют

высокую детализацию (до 10 мкм), стабильность измерений и отсутствие артефактов в 3D-моделях объектов различного масштаба (от мелких деталей до крупногабаритных изделий). Разработанный подход обеспечивает выявление отклонений от допусков, автоматизацию контроля и исключение человеческого фактора, что открывает перспективы для внедрения в метрологию, инженерный анализ и диагностические системы с экономическим эффектом.

Библиографический список.

1. Eissa A.M. Integration of multi-photos and laser scanner data to form a complete 3D model / A.M. Eissa, I.F. Shaker, A.M. Abdel-Wahab [et al.] // Ain Shams Engineering Journal. – 2023. – Vol. 14. – № 5. – DOI: 10.1016/j.asej.2022.101952.
2. Rhisheekesan A. Review on digital holography techniques using digital micromirror device / A. Rhisheekesan, D. Thomas, K.V. Raj [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. – 2024. – Vol. 177. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108120.
3. Cheremkhin P.A. DMD-based optical pattern recognition using holograms generated with the Hartley transform / P.A. Cheremkhin, V.V. Krasnov, V.G. Rodin // Optics and Lasers in Engineering. – 2023. – Vol. 166. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107584.
4. Zhang Y. DMD-based autostereoscopic display system for 3D interaction / Y. Zhang, A. Travis // Electronics Letters. – 2008. – Vol. 44. – № 1. – P. 22-24. – DOI: 10.1049/el:20082427.
5. Электрооборудование и электроника автомобилей. Краткий толковый русско-английский терминологический словарь-справочник / С.М. Зуев, Д.О. Варламов, А.А. Лавриков [и др.]; под общ. ред. С.М. Зуева. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 200 с.
6. Yoon T. Emerging applications of digital micromirror devices in biophotonic fields / T. Yoon, C.-S. Kim, K. Kim // Optics and Laser Technology. – 2018. – Vol. 104. – P. 17-25. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.02.005.
7. Zhao S. Generation of structured beams with optional turbulence levels using a digital micromirror device / S. Zhao, Z. Zhang, Y. Gao // Optics Communications. – 2023. – Vol. 529 – DOI: 10.1016/j.optcom.2022.129084.
8. Зуев С.М. Энергетическая эффективность систем электрооборудования автономных объектов / С.М. Зуев, Р.А. Малеев, А.Е. Чернов. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 170 с.
9. Зуев С.М. Выбор конструкции и расчет параметров системы управления драйвера лазерной осветительной системы / С.М. Зуев, Д.О. Варламов, Д.А. Прохоров // Вопросы электротехнологии. – 2022. – № 4. – С. 28-37.
10. Mott E.J. Digital micromirror device (DMD)-based 3D printing of poly (propylene fumarate) scaffolds / E.J. Mott, M. Busso, X. Luo // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – Vol. 61. – P. 301-311. – DOI: 10.1016/j.msec.2015.11.071.
11. Zuev S.M. Analysis of the characteristics of a laser lighting device / S.M. Zuev, D.O. Varlamov, V.V. Kuksa // Instruments and Experimental Techniques. – 2021. – Vol. 64. – № 6. – P. 834-839. – DOI:

10.1134/S0020441221060130.

12. Zhang Y. Multiwavelength switchable fiber laser employing a DMD as tuning element and variable optical attenuator / Y. Zhang, X. Chen, H. Wu // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 142. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107276.

¹Зуев Сергей Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доц., начальник управления подготовки кадров высшей квалификации и ДПО, доцент, sergei_zuev@mail.ru, Россия, Москва, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

²Дебелов Владимир Валентинович, канд. техн. наук, доцент, debelovvladimir@yahoo.com, Россия, Москва, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

³Куракина Елена Александровна, студент, debelovvladimir@yahoo.com, Россия, Москва, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

Zuev Sergey Mikhailovich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Head of the Department for Training Highly Qualified Personnel and Continuing Professional Education, Associate Professor, sergei_zuev@mail.ru, Russia, Moscow, Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute, MIREA – Russian Technological University

Debelov Vladimir Valentinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, debelovvladimir@yahoo.com, Russia, Moscow, MIREA – Russian Technological University

Kurakina Elena Aleksandrovna, Student, debelovvladimir@yahoo.com, Russia, Moscow, MIREA – Russian Technological University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №4(32) 2025 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(8692)435002

<https://www.sevsu.ru/nauka/nt-potencial/pechat-izdaniya-vedushim/avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashino-priborostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ,

адрес типографии ФГАОУ ВО СевГУ:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино- приборостроении» обязательна.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.
Севастополь, 299053.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Филипович Олег Викторович

Подписано к печати 14.11.2025. Заказ 21/2025. Дата выхода в свет: 10.12.2025. Тираж: 50 экз.

Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,95.

Севастополь, 2025