

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№1(33)
2026

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, 2026

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)

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Димин М.Э., Крамарь О.А., Душко В.Р. Разработка эффективных 4
методов кооперирующего взаимодействия подводных робототехнических
систем с использованием гидроакустического канала связи
Бурлака В.В., Гулаков С.В., Головин А.Ю. Экспериментальный 15
контроллер управления беспилотными аппаратами
Грушун А.И., Грушун Т.А., Осадченко А.Е. Анализ периодических 27
режимов в нелинейной системе автоматического управления
промышленного робота
Шаталова Ю.Г., Чаленков Н.И., Пестрякова А.В. Анализ моделей 36
реализации распределенной базы данных промышленного предприятия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Чернега В.С., Карлусов В.Ю., Лушина В.С. Альтернативные 44
стохастические сетевые модели при планировании ремонтных работ в
машино- и приборостроении
Бохонский А.И., Варминская Н.И., Филипович О.В. Применение 55
функционалов законов распределения Гаусса и Рэлея в вероятностных
моделях
Мирзоян Н.Ю., Заморёнов М.В., Заморёнов И.М., Малицкая А.А. 61
Применение метода путей для оценки надежности электродвигателя

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Балакина Н.А. Анализ производительности контрольно-сортировочных 69
автоматов с повторными измерениями
Васютенко А.П., Балакина Н.А. Тензометрическое весоизмерительное 81
устройство
Бурлака В.В. Модуль обработки изображения с аналоговой камеры для 90
беспилотных аппаратов
Балакин А.И., Васютенко А.П. Исследование точности подналадки 99
бесцентрово-шлифовальных станков
Теткин И.Ю., Рафиков М.Б., Калинин И.А., Марченко Ю.Г. Измерение 109
крутящего момента в бесщёточных двигателях постоянного тока: методы и
оценка границ применимости

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

- Dimin M.E., Kramar O.A., Dushko V.R.** Development of an effective method for cooperative interaction of underwater robotic systems using a hydroacoustic communication channel 4
- Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu.** Experimental controller for unmanned vehicles 15
- Grushun A.I., Grushun T.A., Osadchenko A.E.** Analysis of periodic modes in a nonlinear automatic control system of an industrial robot 27
- Shatalova J.G., Chalenkov N.I., Pestryakova A.V.** Analysis of models for implementing a distributed database in an industrial enterprise 36

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

- Chernega V.S., Karlusov V.Yu., Lushina V.S.** Alternative stochastic network models in planning repair work in mechanical engineering and instrumentation 44
- Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Filipovich O.V.** Application of functionals of the Gaussian and Rayleigh distribution laws in probabilistic models 55
- Mirzoyan N.Y., Zamoryonov M.V., Zamoryonov I.M., Malitskaya A.A.** Application of the path method for reliability assessment of an electric motor 61

MEASURING INSTRUMENTS AND METHODS

- Balakina N.A.** Performance analysis of control and sorting automatic machines with repeated measurements 69
- Vasyutenko A.P., Balakina N.A.** Tenzometric weighing device 81
- Burlaka V.V.** Analog camera image processing module for unmanned vehicles 90
- Balakin A.I., Vasyutenko A.P.** Study on the accuracy of adjusting centerless grinding machines 99
- Tetkin I.Y., Rafikov M.B., Kalinin I.A., Marchenko Y.G.** Torque measurement in brushless DC motors: methods and assessment of the limits of applicability 109

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

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
КООПЕРИРУЮЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ**

Димин М.Э.¹, Крамарь О.А.², Душко В.Р.³

**DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE METHOD FOR
COOPERATIVE INTERACTION OF UNDERWATER ROBOTIC
SYSTEMS USING A HYDROACOUSTIC COMMUNICATION
CHANNEL**

Dimin M.E.¹, Kramar O.A.², Dushko V.R.³

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения эффективности взаимодействия подводных аппаратов, оснащённых гидроакустическими модулями связи. Основное внимание уделено ограничениям, которые возникают при передаче данных и координации группы роботов в условиях подводной среды. В качестве решения предложена концепция сетевой пользовательской надстройки, ориентированной на коммуникационные и навигационные модули, использующие гидроакустический канал для расширения функциональных возможностей существующих модемов.

Такая надстройка позволяет организовать более устойчивый обмен информацией между аппаратами и повысить надёжность групповой работы. Дополнительно обсуждаются предпосылки необходимости создания надстройки, потенциальные выгоды внедрения сетевых механизмов в системы подводной связи и приводится анализ разработанного решения, в том числе, возможные сценарии применения в реальных условиях эксплуатации.

Abstract. This paper addresses the challenge of improving the efficiency of interaction among underwater vehicles equipped with hydroacoustic communication modules. Particular attention is given to the limitations that arise in data transmission and coordination of multiple robots in the underwater environment. As a solution, the concept of a network user overlay is proposed, designed for communication and navigation modules that utilize the hydroacoustic channel to extend the functional capabilities of existing modems.

The proposed overlay enables more stable information exchange between vehicles and increases the reliability of cooperative operation. Furthermore, the paper discusses the prerequisites for developing such an overlay, the potential benefits of integrating networking mechanisms into underwater communication systems, and presents an analysis of the developed solution, including possible scenarios of practical deployment.

Ключевые слова. Подводные роботы, гидроакустические сети, беспроводная подводная связь, протоколы связи.

Keywords. Underwater robots, hydroacoustic networks, wireless underwater communication, communication protocols.

Введение.

Современные достижения в области морской инженерии открывают возможность использования целых групп автономных подводных станций, которые могут взаимодействовать между собой с помощью акустических каналов связи [1-4]. Такие сети востребованы в самых разных областях: от обследования подводных сооружений и проведения ремонтных операций до военных и исследовательских задач. Особенно актуальной данная технология становится в случае управления флотилиями необитаемых подводных аппаратов, где от стабильности обмена данными напрямую зависит успешность выполнения миссии.

Однако большинство существующих решений производителей гидроакустических модемов рассчитаны на режим прямого взаимодействия между двумя устройствами (point-to-point). Такая архитектура обеспечивает корректную работу в простых сценариях, но существенно ограничивает масштабируемость систем и не позволяет реализовать полноценные распределённые сети.

В задачах, связанных с координацией большого числа роботов, например, при построении Морского интернета вещей (MIoT) [5-7], мониторинге протяжённой инфраструктуры, проведении поисково-спасательных операций или картографировании морского дна – требуется сложная многоузловая инфраструктура. Отсутствие встроенных механизмов сетевой маршрутизации и синхронизации данных в существующих модемах превращается в серьёзный барьер для практического применения.

Одним из направлений решения этой проблемы является создание программной сетевой надстройки, которая берёт на себя функции распределённой координации и управления обменом пакетами между различными устройствами. Такая надстройка может быть реализована как отдельный программный каркас, совместимый с модемами разных производителей, и обеспечивать единый интерфейс взаимодействия. Реализация подобных решений сегодня становится ключевым шагом к формированию устойчивых подводных сетей, способных обслуживать целые группы робототехнических систем.

Как отмечалось ранее, одной из ключевых задач является создание дополнительного сетевого уровня, позволяющего координировать взаимодействие множества гидроакустических модемов. На сегодняшний день существует несколько открытых фреймворков, которые решают эту задачу и могут служить основой для построения подводных сенсорных сетей:

- EviNS (Evologics intelligent Networking Software Framework) [8]: открытый программный каркас от компании Evologics, ориентированный на разработку подводных сетей связи и систем позиционирования. Он предоставляет набор инструментов для моделирования и практического тестирования взаимодействия модемов, основанного на акустическом канале;

- DESERT [9]: разработка Университета Падуи, предназначенная для исследования мультимодальных сетей (оптических и акустических). Поддерживает как симуляцию, так и проведение реальных экспериментов;

- SUNSET [10]: усовершенствованный фреймворк для имитации,

отладки и натурных испытаний беспроводных подводных сенсорных сетей. Поддерживает эмуляцию модемов разных типов;

– UNetStack [11]: агентно-ориентированный стек сетевых протоколов, который позволяет гибко строить архитектуру взаимодействия, не ограничиваясь традиционным многоуровневым подходом.

Сравнительный анализ показывает, что среди перечисленных решений наиболее удобным с точки зрения энергоэффективности и требуемых вычислительных ресурсов является EviNS. Он написан на Erlang, поддерживает открытый исходный код и даёт возможность быстро адаптировать новые протоколы под конкретные задачи. Именно поэтому при разработке алгоритмов беспроводной подводной связи мы использовали данный каркас в качестве базовой платформы, а также расширили его возможностями подключения модемов других производителей.

Для обеспечения совместимости применялись специализированные модули-парсеры, которые преобразуют входящие и исходящие команды в унифицированный формат. Такой подход позволяет объединять оборудование разных фирм и постепенно формировать гибридные сети, не зависящие от конкретного поставщика.

Целью работы является разработка и исследование метода эффективного управления обменом данными в подводной сети автономных аппаратов, основанного на сетевой программной надстройке, обеспечивающей взаимодействие между узлами вне зоны прямой акустической связи и сочетающей классические методы разрешения коллизий с адаптивными подходами комбинирования данных методов.

Концепция реализации.

Предлагаемая архитектура основана на парадигме событийного программирования: логика работы строится в виде конечного автомата (FSM, Finite State Machine). Каждое состояние системы описывает определённый режим функционирования, а переходы между состояниями инициируются либо внутренними событиями (например, срабатывание таймера), либо внешними сигналами (получение пакета или управляющей команды).

Для примера в таблице 1 приведён фрагмент переходов между состояниями для протокола канального уровня T-Lohi. Такая модель обеспечивает гибкость управления и позволяет адаптировать стек под специфику различных сценариев связи.

Кроме того, разработанный каркас включает в себя:

- модули парсинга и генерации сообщений;
- реализации протоколов канального и сетевого уровней модели OSI;
- интерфейсы взаимодействия (COM-порт, сетевой сокет).

За счёт модульного построения становится возможным расширение функционала без изменения всей системы: можно подключать новые модемы, реализовывать дополнительные протоколы или адаптировать каркас под конкретные задачи пользователя.

В следующем пункте приведено описание обозначенных протоколов с алгоритмической точки зрения.

Таблица 1 – Таблица переходов протокола канального уровня T-Lohi

Состояние	Событие	Новое состояние
Idle_state	internal	Idle state
	end of frame	Idle state
	rcv_data	Idle state
	transmit_CT	CR_state
	rcv_CT	Blocking_state
...		
Backoff_state	end of frame	Backoff_state
	rcv_data	Backoff_state
	rcv_CT	Blocking_state
	backoff_end	CR_state

Стек канального уровня (TLoHi-DACAP).

Физическая структура большинства гидроакустических модемов ориентирована на работу в асинхронном режиме. Когда число одновременно действующих устройств превышает два или три, появляются существенные проблемы: коллизии сигналов, взаимные помехи и потеря пакетов. Для преодоления этих ограничений применяются протоколы канального уровня, которые организуют более упорядоченный доступ к среде передачи [12-15]. Их ключевая идея – использование задержек распространения звука и специальных процедур резервирования канала.

DACAP (Distance Aware Collision Avoidance Protocol) [16] строится на принципе оценки расстояния между передающим и принимающим узлами. Чем ближе находятся устройства друг к другу, тем выше вероятность коллизии. Для минимизации этих ситуаций применяется механизм приоритизации: узлы, находящиеся дальше, получают больший приоритет в доступе к каналу.

Алгоритм использует традиционную схему запросов RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send). Когда у узла есть данные, он отправляет RTS. Адресат, готовый принять передачу, отвечает CTS. Узлы, которые услышали RTS, но не являются получателями, временно переходят в состояние ожидания (backoff). Длительность паузы рассчитывается на основе времени распространения акустического сигнала и параметров передачи. Это позволяет согласовать одновременный доступ и снизить вероятность коллизий. Расчёт производится согласно выражению (1)

$$T_{per} = \begin{cases} t_{\min} - 2U / c, & U / c > \frac{t_{\min} - \min(\Delta D / c, t_{data}, 2T - t_{\min})}{2} \\ 2(U + \Delta D) / c - t_{\min}, & U / c < \frac{t_{\min} - \min(\Delta D / c, t_{data}, 2T - t_{\min})}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения звука в воде; $U + \Delta D$ – минимальное расстояние до интерферирующего узла, на котором еще возможен корректный прием; t_{data} – скорость передачи данных; $t_{\min}$ – время передачи сигналов CTS/RTS.

Другим подходом является использование протокола Tone-Lohi [17-18], который делает акцент на энергоэффективности и простоте

реализации. Основой механизма является обмен короткими сигналами – тонами. Каждый узел, желающий передать данные, отправляет тон в рамках специального соревновательного интервала (Contention Round, CR). Количество полученных тонов позволяет устройствам оценить число конкурентов.

Длительность соревновательного интервала определяется как сумма времени передачи одного тона и максимально возможной продолжительности передачи пакета. Если узел в ходе CR обнаруживает наличие конкурентов, он уходит в режим «отката» (backoff), продолжительность которого выбирается случайным образом в пределах допустимого диапазона. Если же конкурентов нет, узел резервирует канал и выполняет передачу:

$$CR = T_{\max} + T_{\text{tone}}, \quad (2)$$

где $T_{\max}$ – максимальное время передачи пакета; T_{tone} – время передачи одного тона.

Подобный механизм позволяет согласовать работу в условиях значительных задержек акустического сигнала и предотвращает лавинообразное нарастание коллизий. В отличие от DACAP, T-Lohi требует меньше служебного трафика и потребляет меньше энергии, что особенно важно для автономных роботов, ограниченных в ресурсах.

Стек сетевого уровня (DPFlooding - ICRP).

Протоколы канального уровня обеспечивают базовую возможность совместного доступа к среде передачи, но сами по себе они не формируют полноценную сеть. Чтобы объединить отдельные узлы в единую систему и обеспечить маршрутизацию пакетов, необходимы решения сетевого уровня. В текущей работе реализованы и протестированы два таких протокола: Dynamic Probabilistic Flooding (DPFlooding) [19] и Information-Carrying based Routing Protocol (ICRP) [20].

Классический механизм flooding («затопления») предполагает, что каждый получивший пакет узел пересылает его всем своим соседям. Такой подход гарантирует доставку, но приводит к огромному числу избыточных сообщений и риску возникновения так называемого широковещательного шторма.

Модификация в виде DPFlooding [19] решает эту проблему за счёт вероятностной пересылки. Для каждого узла вероятность повторной передачи зависит от количества соседей: чем их больше, тем ниже вероятность ретрансляции. Таким образом, сокращается дублирование пакетов и снижается нагрузка на сеть, при этом сохраняется высокая вероятность доставки сообщений до всех участников.

Другой реализованный протокол – ICRP (Information-Carrying based Routing Protocol) [20]. Его ключевая особенность состоит в том, что служебная информация о маршрутизации передаётся не отдельно, а встраивается прямо в пакеты с полезными данными. Такой подход сокращает накладные расходы, уменьшает время согласования маршрута и повышает энергоэффективность сети.

Алгоритм работы начинается с рассылки узлом своего маршрутизирующего пакета ближайшим соседям. Получив информацию, каждый узел сравнивает её с собственными таблицами маршрутов. Если

предложенный путь оказывается лучше по выбранной метрике, он обновляет свои записи. В качестве метрики используется комплексный показатель, учитывающий пропускную способность канала, задержку передачи и успешность доставки. Наиболее предпочтительным становится маршрут с минимальным значением метрики, что обеспечивает баланс между скоростью и надёжностью передачи:

$$P_{route} = [\frac{K_1}{K_2} + K_2 D_c] r, \quad (3)$$

где K_1 и K_2 – константы, являющиеся весовыми коэффициентами пропускной способности и задержки; Ve – эффективная пропускная способность, которая определяется как произведение полосы пропускания на загруженность канала; D_c – время задержки; r – успешность передачи (количество успешно переданной информации в процентном отношении).

Анализ полученных результатов.

Для оценки эффективности разработанного сетевого каркаса была создана экспериментальная установка, включающая аппаратный эмулятор гидроакустических модемов (Рис.1,а) и реальные устройства типа uWave Redline производства UC&NL (Рис.1,б). Эмулятор представляет собой одноплатный вычислительный модуль, на котором программно реализована имитация подводной сети с возможностью изменения её топологии и параметров взаимодействия.

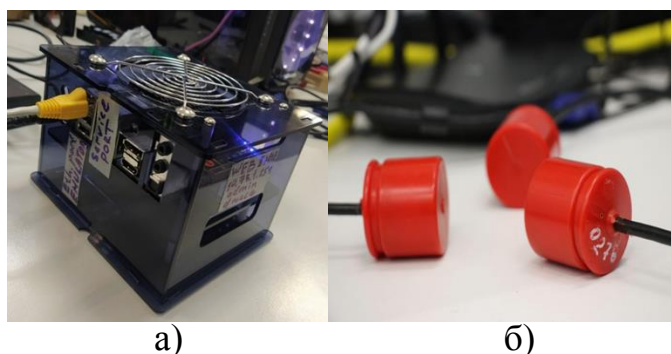


Рис.1 – Аппаратные средства для испытаний алгоритмов:
а) эмулятор гидроакустических модемов; б) г/а модемы uWave Redline

В ходе испытаний рассматривались два режима работы:

- асинхронный режим «точка-точка» (p2p): при взаимодействии трёх узлов без применения сетевых протоколов;
- многоузловой режим: с участием до шести модемов и активированным стеком канального и сетевого уровней.

Схематическое расположение узлов сети показано на Рис.2. Для тестирования использовались пакеты длиной 20 байт, содержащие навигационную информацию условного подводного аппарата. Каждый эксперимент включал передачу 20 таких пакетов.

Первым этапом экспериментов стала оценка базовой производительности сети без использования протоколов. Затем последовательно включались механизмы T-Lohi и DACAR, что позволило зафиксировать влияние алгоритмов на качество связи. Полученные

результаты (Рис.3-5) демонстрируют отчётливую тенденцию: при использовании канальных протоколов снижается средняя скорость передачи данных, однако растёт доля успешно доставленных пакетов. Такая динамика подтверждает ожидаемый компромисс между пропускной способностью и надёжностью передачи.

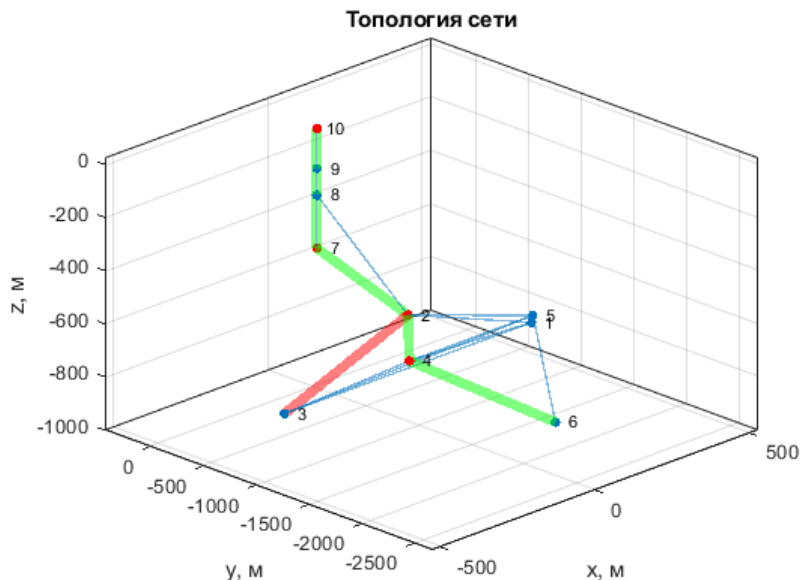


Рис.2 – Схема расположения модемов

Дополнительно были проведены испытания с задействованием протоколов сетевого уровня. В частности, моделировался сценарий, при котором узел М7 передавал данные узлу М5 через промежуточные ретрансляторы М1 и М10, поскольку прямая связь между ними отсутствовала. Полученные данные подтвердили, что комбинация протоколов DPFlooding и ICRP обеспечивает устойчивую маршрутизацию даже в условиях сложной топологии сети и значительных акустических задержек.

Результаты экспериментов приведены на Рис.3-5.

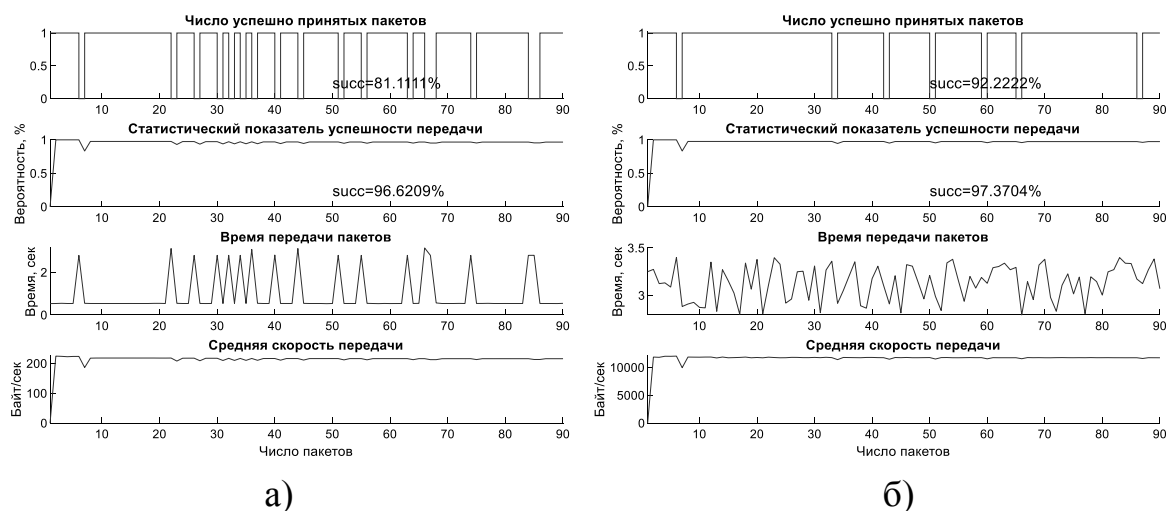


Рис.3 – Результаты передачи без использования протоколов с использованием: а) модемов uWave; б) эмулятора

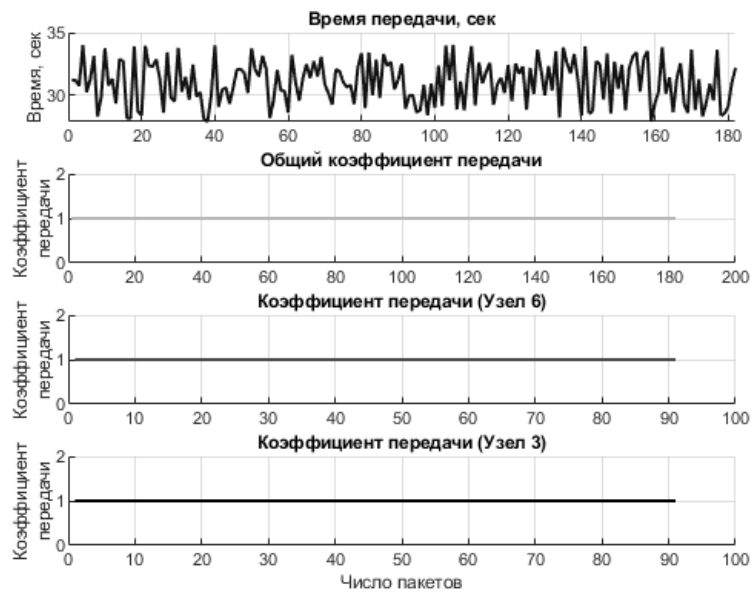


Рис.4 – Результаты передачи с использованием протокола T-Lohi

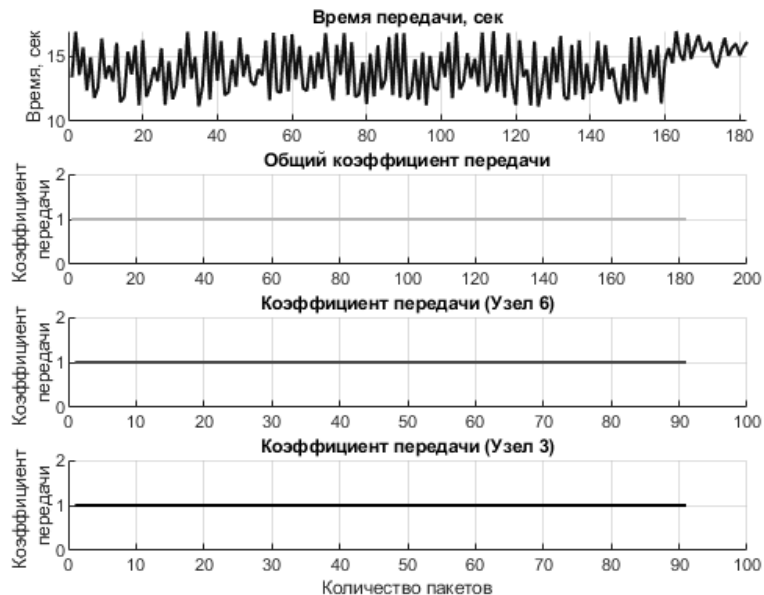


Рис.5 – Результаты передачи с использованием протокола DACAP

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что использование предложенной архитектуры существенно повышает надёжность передачи данных и устойчивость связи в многомодемных системах, что особенно важно для задач коллективной работы подводных аппаратов.

Заключение.

В рамках данного исследования разработан программный каркас, обеспечивающий кооперативное взаимодействие подводных робототехнических систем с использованием гидроакустического канала связи. Решение объединяет два уровня сетевой архитектуры:

– канальный уровень, представленный протоколами DACAP и T-Lohi, которые организуют доступ к среде и эффективно устраняют

коллизии за счёт использования задержек распространения и механизмов приоритизации;

– сетевой уровень, реализованный на основе протоколов DPFlooding и ICRP, позволяющих формировать распределённые маршруты и обеспечивать надёжную доставку данных в многозвенных сетях.

Экспериментальные испытания подтвердили, что применение предложенных алгоритмов повышает вероятность успешной передачи информации и устойчивость соединения. Несмотря на некоторое снижение пропускной способности, выигрыш в надёжности и предсказуемости доставки данных оказывается решающим для задач управления автономными подводными аппаратами, где критически важна гарантированная передача команд и телеметрии.

Созданный каркас может быть легко расширен за счёт подключения модемов различных производителей и интеграции дополнительных протоколов. В перспективе данная разработка может стать основой для построения гетерогенных сетей в рамках концепции Морского интернета вещей (МIoT) и использоваться при реализации миссий с участием групп автономных необитаемых подводных аппаратов, выполняющих исследовательские, мониторинговые и прикладные задачи.

Библиографический список.

1. Ali M.F. Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications / M.F. Ali, D.N.K. Jayakody, Y.A. Chursin // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2020, Vol. 27. – P. 1379-1412.
2. Schirripa Spagnolo G. Underwater Optical Wireless Communications: Overview / G. Schirripa Spagnolo, L. Cozzella, F. Leccese // Sensors. – 2020. – № 20(8). – 14 p. – DOI: 10.3390/s20082261.
3. Zeng Zh. A Survey of Underwater Wireless Optical Communication / Zh. Zeng, H. Zhang, J. Cheng [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 19. – Iss. 1. – P. 204-238. – DOI: 10.1109/COMST.2016.2618841.
4. Kebkal K.G. Digital hydroacoustic networks in problems of underwater telemetry and navigation / K.G. Kebkal, V.K. Kebkal // International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering, Saint-Petersburg, Russia, 6-8 June 2016. – Saint-Petersburg : SMTU, 2016. – ISBN 978-5-88303-557-8.
5. Kabanov A.A. Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures / A.A. Kabanov, V.A. Kramar // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – Iss. 9. – 31 p. – DOI: 10.3390/jmse10091279
6. Wang M.M. Machine-type communication for maritime internet of things: a design / M.M. Wang, J. Zhang, X. You // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Vol. 22. – P. 2550-2585.
7. Mohsan S.A.H. Towards the internet of underwater things: a comprehensive survey / S.A.H. Mohsan, A. Mazinani, N.Q.H. Othman [et al.] // Earth Science Informatics. – 2022. – Vol. 15. – P. 735-764. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00762-8>.
8. Kebkal O. EviNS: framework for development of underwater acoustic sensor networks and positioning systems / O. Kebkal, V. Kebkal, K. Kebkal

- // OCEANS 2015 – Genova, Genova, Italy, 18-21 May 2015. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2015. – 6 p. – DOI:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271768
9. Masiero R. DESERT Underwater: an NS-Miracle based framework to design, simulate, emulate and realize test-beds for Underwater network protocols / R. Masiero, S. Azad, F. Favaro [et al.] // 2012 Oceans – Yeosu, Yeosu, Korea (South), 21-24 May 2012. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2012. – DOI: 10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263524.
 10. Petrioli C. The SUNSET Framework for Simulation, Emulation and at-sea Testing of Underwater Wireless Sensor Networks / C. Petrioli, R. Petrocchia, J. Potter // Ad Hoc Networks. – 2014. – № 34. – P. 224-238.
 11. Chitre M. UnetStack: An agent-based software stack and simulator for underwater networks / M. Chitre, R. Bhatnagar, W-S. Soh // 2014 Oceans - St. John's, St. John's, NL, Canada, 14-19 September 2014. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2014. – DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003044.
 12. Kebkal O. D-MAC: Hybrid media access control for underwater acoustic sensor networks / O. Kebkal, M. Komar, K. Kebkal // 2010 IEEE International Conference on Communications Workshops, Cape Town, South Africa, 23-27 May 2010. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2010. – DOI: 10.1109/ICCW.2010.5503951.
 13. Rodoplu V. An energy-efficient MAC protocol for underwater wireless acoustic networks / V. Rodoplu, M.K. Park // Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE, Washington, DC, USA, 17-23 September 2005. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2006. – DOI: 10.1109/OCEANS.2005.1639918.
 14. Ye W. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling / W. Ye, J. Heidemann // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 7. – № 4. – P. 343-352. – URL: <http://indust-engineering.ru>.
 15. Guerra F. MAC Protocols for Monitoring and Event Detection in Underwater Networks Employing a FH-BFSK Physical Layer / F. Guerra, P. Casari, M. Zorzi // Acoustic Sensor Networks, IEEE Comm. Letters. – 2007. – Vol. 11. – Iss. 12. – P. 1025-1027.
 16. Peleato B. Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad-Hoc Underwater Acoustic Sensor Networks / B. Peleato, M. Stojanovic // IEEE Communication Letters. – 2008. – Vol. 11. – Iss. 12. – P. 1025-1027.
 17. Syed A.A. Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks / A.A. Syed, W. Ye, J. Heidemann // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2008. – Vol. 26. – № 9. – P. 1731-1743. – DOI: <http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Syed08b.pdf>.
 18. Syed A.A. T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks / A.A. Syed, W. Ye, J. Heidemann // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2008. – Vol. 26. – № 9. – P. 1731-1743.
 19. Cavin D. Probabilistic Broadcast for Flooding in Wireless Mobile Ad hoc Networks / D. Cavin, A. Schiper // 2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. Vol. 2, New Orleans, LA, USA, 16-20 March 2003. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2003. – 14 p. – DOI:10.1109/WCNC.2003.1200529.

20. Liang W. Information-Carrying Based Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Network / W. Liang, H. Yu, L. Liu [et al.] // 2007 International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 5-8 August 2007. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2007. – P. 729-734. – DOI: 10.1109/ICMA.2007.4303634.

¹Димин Максим Эдуардович, лаборант-исследователь, dimin.maksim@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Крамарь Олег Александрович, старший преподаватель, rolets@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

³Душко Вероника Ростиславовна, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, vrdushko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Dimin Maksim Eduardovich, Research Laboratory Technician, dimin.maksim@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Kramar Oleg Alexandrovich, Senior Lecturer, rolets@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Dushko Veronika Rostislavovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Proffessor, Head of the Department, vrdushko@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ

Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Головин А.Ю.³

EXPERIMENTAL CONTROLLER FOR UNMANNED VEHICLES

Burlaka V.V.¹, Gulakov S.V.², Golovin A.Yu.³

Аннотация. В работе предложен простой в изготовлении контроллер, позволяющий решать задачи управления беспилотными аппаратами (как воздушными, так и наземными). Контроллер оснащен гироскопом, акселерометром, магнитометром, барометром. Реализована функция вывода информации в аналоговый видеосигнал (OSD) либо самостоятельное формирование видеосигнала при отказе видеокамеры. Возможна маскировка картинки с видеокамеры за счет наложения псевдослучайного шума при сохранении OSD. Имеется также возможность переключения сигнала от разных видеокамер, а также выполнять простое шифрование видеосигнала, включающее сокрытие синхроимпульсов. Предусмотрена возможность подключения до двух модулей ультразвуковых дальнометров (например, для обеспечения автоматической мягкой посадки).

Abstract. In the paper, a simple-to-build controller is proposed that allows solving problems of controlling unmanned vehicles (both air and ground). The controller is equipped with a gyroscope, accelerometer, magnetometer, and barometer. The function of outputting information into an analog video signal (On Screen Display, OSD) or standalone formation of a video signal in case of a video camera failure is implemented. It is possible to mask the image from the video camera by superimposing pseudo-random noise while maintaining the OSD. It is also possible to switch the signal from different video cameras, as well as to perform simple encryption of the video signal, including hiding sync pulses. It is possible to connect up to two ultrasonic rangefinder modules (for example, to accomplish automatic soft landing).

Ключевые слова. Беспилотный аппарат, БПЛА, полетный контроллер, OSD, шифрование видео, низкая себестоимость, дополнительный функционал.

Keywords. Unmanned vehicle, UAV, flight controller, video encryption, low cost, additional functionality.

Введение.

Беспилотные аппараты в настоящее время получают все большее распространение для решения самых различных задач. Управление бортовыми устройствами этих аппаратов осуществляется специализированным контроллером, который выполняет обработку потоков информации, поступающей от приемника (или приемников), данных инерциальной измерительной системы, данных от приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GPS, GLONASS, BeiDou), данных от различных бортовых датчиков и т.д. По результатам обработки контроллер формирует команды управления

бортовыми исполнительными механизмами: сервоприводами, контроллерами управления двигателями и т.д.

В настоящее время разработано множество контроллеров беспилотных аппаратов, имеющих широкий функционал, в том числе есть проекты с открытым исходным кодом (ArduPilot, PixHawk и т.д.). Имеется большой выбор аппаратных платформ с различным набором периферии.

Так, для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) широкое распространение в нижнем ценовом сегменте получили полетные контроллеры SpeedyBee F405 [1]. Это достаточно универсальная разработка, с хорошим набором интерфейсов для работы с периферийными устройствами, весьма высокой вычислительной мощностью, обеспечиваемой однокристальным микроконтроллером STM32F405 [2] с ядром ARM Cortex-M4.

В то же время имеется ряд прикладных задач, которые предполагают одноразовое использование беспилотного аппарата либо одновременное использование большого количества таких аппаратов. При этом набор требуемых функций обычно невелик и применение универсальных контроллеров представляется избыточным, в том числе и из экономических соображений.

Целью настоящей работы является создание контроллера беспилотного наземного или летательного аппарата, имеющего минимально необходимый набор функций для выполнения прикладных задач, простого в изготовлении и имеющего небольшую себестоимость.

Основная часть.

Для решения поставленной задачи с невысокими требованиями к вычислительной мощности и минимальной стоимостью изделия его схема спроектирована из условий уменьшения количества используемых компонентов и максимального использования ресурсов однокристального микроконтроллера, являющегося «мозгом» изделия. Также ограничен до минимума реализованный набор функций. Убрана поддержка USB и карты памяти MicroSD, запись журнала событий не ведется. Работа с видеосигналом также возложена на микроконтроллер, что позволило избавиться от специализированной микросхемы вывода информации в кадр (OSD – On Screen Display) – обычно для этой цели используют MAX7456 [3], AT7456 или их аналоги. Гироскоп, акселерометр, магнетометр и барометр применены в составе готового модуля GY-87 или HW-290. Такое решение снижает технологические требования к печатной плате и упрощает сборку в условиях отсутствия специализированного оборудования для монтажа микросхем в корпусах QFN, LCC, LGA. В подсистеме питания также использован готовый модуль понижающего DC/DC преобразователя на микросхеме CN3903.

Для удобства применения реализована возможность переключения источника видеосигнала, что дает возможность использовать две камеры (например, камеру видимого диапазона и тепловизор с выходом аналогового видеосигнала; либо две камеры, имеющие разные направления обзора). Кроме того, введена функция маскировки сигнала с камеры цифровым шумом, а также обеспечено формирование видеосигнала при отсутствии или отказе камеры (т.е. оператор сможет видеть данные OSD). При необходимости количество источников

видеосигнала может быть легко увеличено. Кроме этого, имеется возможность включения инверсии видеосигнала и включения режима скрывания синхроимпульсов.

Реализована возможность работы с модулями ультразвуковых дальномеров (HC-SR04, US100 и их аналоги) – производится замер интервала времени между сигналом старта ультразвуковой посылки (Trigger) и сигналом приема отраженного ультразвука (Echo). Возможно подключение до двух таких дальномеров. Функция может быть использована, например, для автоматического осуществления мягкой посадки БПЛА путем контроля высоты по дальномеру, направленному вниз.

В изделии предусмотрены два аналоговых входа с диапазоном 0...+3,3 В. Они могут быть использованы, например, для измерения тока потребления контроллера двигателя (или двигателей). В схему введен также транзисторный ключ, способный коммутировать целевую нагрузку, подключенную к аккумуляторной батарее.

Для связи с внешними устройствами имеются до 3-х асинхронных последовательных портов UART – реализована поддержка протокола CrossFire для работы с приемниками команд управления. Имеется возможность подключения устройств, работающих с шиной I²C.

Управление двигателями может реализовываться либо путем формирования ШИМ сигналов частотой 50 Гц (целесообразно для управления сервоприводами), либо по протоколу DShot300 [4] (лучшая стабильность и помехоустойчивость).

Принципиальная электрическая схема разработанного контроллера беспилотного аппарата приведена на Рис.1.

Схема построена на основе однокристального микроконтроллера STM32F072C8T6 [5], имеющего достаточный набор бортовой периферии для решения поставленных задач.

Управление двигателями осуществляется с использованием двух 4-канальных бортовых таймеров TIM1 и TIM2. Возможна работа в режиме ШИМ 50 Гц или в режиме DShot300. Выбор доступен для групп M1-M4 и M5-M8, так как режим работы задается для всех 4 каналов таймера сразу.

Данные об ускорениях, угловых скоростях, индукции магнитного поля и давлении считываются микроконтроллером DD1 по шине I²C (выводы PB8, PB9 DD1) с модуля GY-87 или HW-290, содержащего микроэлектромеханический трехосевой акселерометр+гироскоп MPU6050 [6], трехосевой магнитометр HMC5883 [7] и барометр BMP180 [8]. В ходе экспериментов было обнаружено, что модули GY-87 или HW-290, приобретенные в разное время, могут иметь установленные магнитометры типа HMC5883L, QMC5883L, QMC5883P, не совместимые программно. По этой причине предусмотрено программное определение типа магнитометра после подачи питания и корректная дальнейшая работа с ним.

Считывание данных акселерометра и гироскопа производится с частотой 1 кГц, чтение данных магнитометра – с частотой 75 Гц, барометра – 30 Гц. Программно реализована проверка «зависания» шины I²C (т.е. когда ведомое устройство удерживает шину SDA в состоянии логического нуля) и предусмотрен алгоритм вывода шины из этого

состояния путем формирования 10 тактовых импульсов на шине SCL с последующим повтором обмена данными с ведомым устройством.

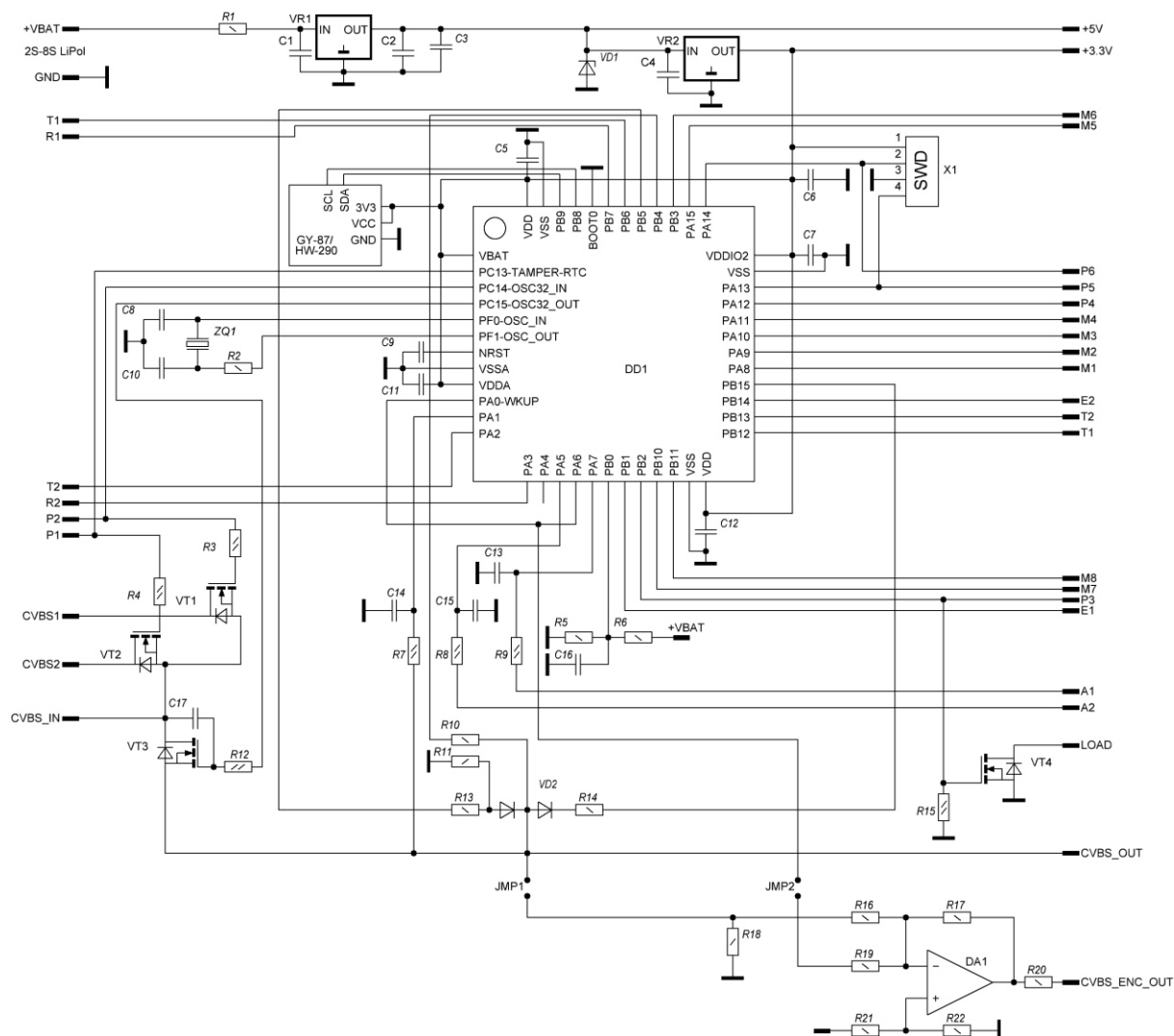


Рис.1 – Схема электрическая принципиальная разработанного контроллера беспилотного аппарата

Данные ускорений и угловых скоростей подвергаются программной фильтрации sinc фильтром первого порядка с целью ослабления влияния вибрации от двигателей. Кроме этого, задействован и цифровой фильтр нижних частот в составе MPU6050.

Работа с ультразвуковыми датчиками организована посредством сигналов T1, E1 и T2, E2. Микроконтроллер формирует на выходах T1 и T2 запускающие импульсы, имеющие длительность 16 мкс и период 65,5 мс, после чего производится замер времени от окончания запускающего импульса до прихода импульса приема отраженного ультразвука (сигналы E1 и E2). Зная скорость звука в воздухе (примерно 330 м/с), выполняется расчет измеренного расстояния.

Имеется возможность переназначения сигналов T2, E2 для работы с внешними I²S устройствами, например, видеомодулятором на микросхеме

MC44BS373 [9] или аналогичной.

Для взаимодействия с внешними устройствами доступны два асинхронных последовательных порта (сигналы R1, T1 и R2, T2). Программно реализована поддержка приемников, работающих с протоколом CrossFire и скоростью обмена 115200 бод. Возможна работа и на скорости 420000 бод (она часто по умолчанию установлена в приемниках ELRS), но при этом увеличивается вероятность потери данных пакетов из-за высокой загрузки микроконтроллера DD1.

Имеется возможность использовать третий последовательный порт за счет переназначения сигналов M7 и M8. Можно также подключить более одного приемника с заданием их приоритетности в целях увеличения надежности связи с оператором.

В ходе экспериментов была также реализована работа с модулями LoRa серий E220 и E32 для передачи команд управления. Правда, использование этих модулей требует выделения двух дополнительных сигналов для управления ими. В то же время использование таких модулей (особенно LoRa E220, отличающегося большей максимальной скоростью передачи данных, чем E32) позволяет реализовать механизм ретрансляции команд управления, что может найти применение при работе группы беспилотных аппаратов, особенно на большом удалении от оператора.

Для повышения универсальности применения изделия в схеме предусмотрены дискретные цифровые выходы P1 – P6. Выходы P1 и P2 используются также для переключения сигналов с видеокамер (если это необходимо); выход P3 имеет дублирующий силовой транзисторный ключ VT4, позволяющий коммутировать нагрузку с током до нескольких ампер при напряжении батареи VBAT (эта нагрузка подключается между контактами LOAD и VBAT). Резистор R15 служит для предотвращения спонтанного открытия VT4 после подачи питания до инициализации DD1. Функционал выходов P1 – P6 определяется программно. Например, можно легко реализовать функцию активации нагрузки при изменении положения изделия в пространстве или при приближении ферромагнитного объекта – для этого достаточно активировать выход P3 по условию изменения данных магнитометра.

Работа с аналоговым видеосигналом реализована следующим образом.

Видеосигналы с камер (входы CVBS1, CVBS2) подаются на вход мультиплексора, выполненного на полевых транзисторах VT1, VT2 с низким пороговым напряжением. Управление затворами этих транзисторов осуществляется с выводов контроллера. Следует заметить, что входные емкости VT1, VT2 имеют порядок нескольких сотен пФ, а это значит, что подключение их затворов к низкоимпедансному источнику сигнала приведет к образованию паразитного ФНЧ, образованного выходным сопротивлением работающей видеокамеры (обычно 75 Ом) и входными емкостями VT1, VT2. Для исключения этого эффекта последовательно с затворами VT1 и VT2 включены резисторы R3, R4 с сопротивлением десятки кОм. Это практически исключает влияние шунтирования видеосигнала входными емкостями VT1, VT2 и улучшает частотную характеристику узла мультиплексирования.

Если мультиплексирование сигналов с двух камер не требуется,

видеосигнал может быть подан на контакт CVBS_IN (это выход мультиплексора), а сигналы управления затворами VT1, VT2, выведенные на контакты P1, P2, могут использоваться как дискретные цифровые выходы. Контакты CVBS1 и CVBS2 при этом должны быть оставлены свободными.

Видеосигнал затем поступает на узел привязки уровня черного, выполненный на элементах VT3, C17, R12. Назначение этого узла – смещение видеосигнала вниз по напряжению таким образом, чтобы уровень синхронизирующих импульсов [10], [11] находился в пределах 0...20 мВ – это необходимо для корректной работы схемы OSD, которая описана далее. Как показала практика, у некоторых аналоговых камер уровень синхронизирующих импульсов может достигать до 500 мВ.

Транзистор VT3 с конденсатором C17 образуют в первом приближении интегрирующее звено с входным сигналом, определяемым током через R12. Емкость конденсатора C17 выбрана так, чтобы напряжение на нем изменялось не более, чем на 1 мВ, за время, равное длительности одной строки изображения (64 мкс). Благодаря большой крутизне характеристики VT3 его напряжение затвор-исток изменяется не более, чем на 0,6 мВ, в диапазоне токов, имеющем место при работе схемы (до 20 мА), а следовательно, и напряжение сток-исток VT3 остается относительно постоянным. Изменять же это напряжение можно за счет переключения состояния вывода PC15 микроконтроллера. В программе реализовано измерение уровня синхроимпульса каждой строки изображения и управление выходным уровнем на выводе PC15: при низком уровне синхроимпульса выставляется логическая единица, в противном случае – логический ноль. Это приводит к медленному заряду или разряду C17, а значит, и изменению напряжения сток-исток VT3. Поскольку VT3 включен последовательно с источником сигнала, то напряжение на видеовыходе (сигнал CVBS_OUT) будет определяться как разность напряжения сигнала с видеовхода CVBS_IN и напряжения сток-исток VT3. Это позволяет поддерживать напряжение на CVBS_OUT таким, чтобы уровень синхронизации был заданным (т.е. 0...20 мВ). Следует отметить, что нормальная работа схемы возможна только при подключении к CVBS_OUT нагрузки (видеопередатчика или монитора) с входным сопротивлением 75 Ом. Также внимательный читатель может заметить, что вместо R3, R4 и R12 можно использовать внутренние «подтягивающие» резисторы DD1, тем самым упростить схему. Но при работе с реальным видеосигналом напряжение на затворах VT1 – VT3 в переходных режимах может выходить за пределы диапазона (0...+3,3 В), а это приведет к открытию защитных диодов на соответствующих выводах DD1 и появлению некоторых искажений видеосигнала. Для исключения этого эффекта и установлены внешние затворные резисторы R3, R4, R12.

Сигнал CVBS_OUT поступает через ФНЧ R7C14, ослабляющий сигналы цветowych поднесущих, на вход бортового аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и вход одного из бортовых компараторов DD1 (выводы PA1, PA4). Компаратор осуществляет выделение синхроимпульсов из видеосигнала путем сравнения его с опорным уровнем, определяемым бортовым цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) DD1 на выводе PA4. Выход компаратора (PA0) подключен к

бортовому таймеру TIM3 DD1 (PA6), сконфигурированному в режиме захвата ШИМ сигнала, что позволяет легко селектировать кадровые, строчные и уравнивающие импульсы. Для повышения помехоустойчивости схемы синхронизации на входе захвата TIM3 задействован цифровой фильтр.

Схема вывода информации в кадр (OSD) выполнена с использованием двух бортовых модулей SPI (Serial Peripheral Interface) микроконтроллера DD1. Выход первого SPI (PB5) подключен через делитель R13R11, имеющий коэффициент деления 3, и один из диодов сборки VD2 к выходу видеосигнала CVBS_OUT. К этой же точке через второй диод сборки VD2 и резистор R14 подключен выход второго SPI (PB15). При появлении логической единицы на выходе PB5 происходит «подтяжка» уровня выходного видеосигнала к напряжению около 1 В (т.е. уровню белого). Появление же логического нуля на PB15 приводит к «подтяжке» уровня видеосигнала к напряжению примерно 0,2...0,3 В (прямое напряжение диода Шоттки VD2), т.е. уровню черного. Такие манипуляции с уровнем видеосигнала возможны благодаря тому, что выходное сопротивление источника видеосигнала (видеокамеры) составляет 75 Ом (в целях снижения отражений в кабеле) и он не является идеальным источником ЭДС. И именно из-за использования такой простой схемы сдвига уровня видеосигнала требуется, чтобы уровень синхронизации был близок к 0 В, для чего и применен узел на VT3, C17, R12.

При работе алгоритма OSD оба модуля SPI используются для формирования синхронизированных со строчными синхроимпульсами последовательностей, приводящих к отображению на экране монитора требуемой информации. Программно реализован вывод текстовой информации с применением знакогенератора (фонта) с размером символа 8×16 пикселей. Фонт размещается во flash памяти DD1 и занимает 4 кБ. Экранный буфер имеет размер 36×16 символов.

Если входной видеосигнал отсутствует (камера отключена или отказала), программно реализовано формирование собственного видеосигнала, содержащего информацию OSD. Синхроимпульсы при этом формируются на выводе PB4 DD1 и через резистор R10 подаются на CVBS_OUT. В нормальном режиме работы PB4 находится в высокоимпедансном состоянии.

Для повышения универсальности изделия реализован режим маскировки видеосигнала цифровым псевдослучайным шумом при сохранении вывода OSD. Примеры работы подсистемы OSD в разных режимах показаны на Рис.2-4.

В схеме изделия предусмотрена возможность получения инвертированного видеосигнала. Для этого предназначен каскад на операционном усилителе DA1 и резисторах R16 – R22, представляющий собой инвертирующий усилитель. Смещение на неинвертирующем входе ОУ определяется делителем R21R22, коэффициент передачи определяется отношением R17/R16. При использовании инвертирующего каскада следует установить перемычку JMP1, которая подключает к выходу видеосигнала CVBS_OUT нагрузочный резистор R18. Контакт CVBS_OUT при этом должен быть оставлен свободным. Инвертированный

видеосигнал (контакт CVBS_ENC_OUT) снимается с выхода DA1 через резистор R20.



Рис.2 – Пример OSD с включенной камерой

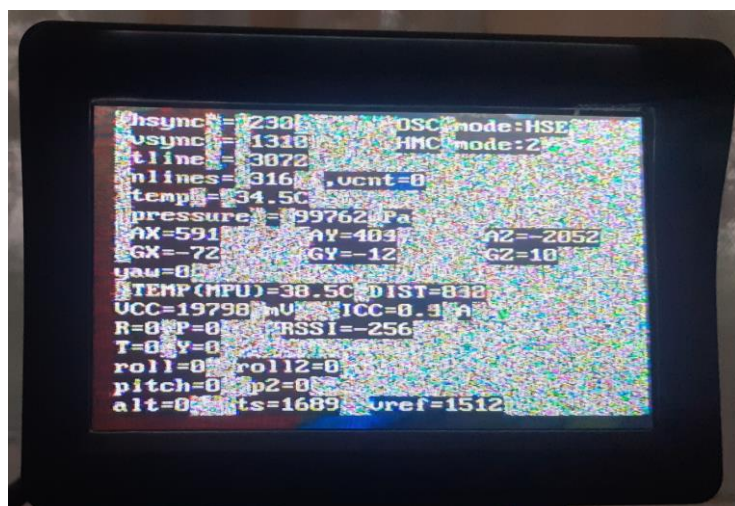


Рис.3 – Пример маскировки картинки с камеры при включенном OSD

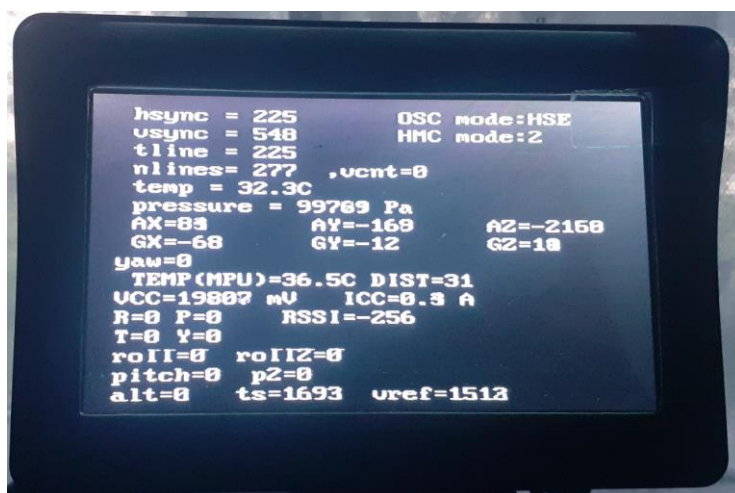


Рис.4 – Формирование видеосигнала с OSD без камеры

Для усложнения идентификации инвертированного сигнала по синхроимпульсам предусмотрена возможность скрытия синхроимпульсов путем установки переключки JMP2, подключающей резистор R19 между инверсным входом DA1 и выходом компаратора уровня синхронизации. В этом случае имеет место двойная инверсия синхроимпульсов, в результате чего они смещаются в область уровней сигнала яркости, что затрудняет их обнаружение. Однако для восстановления видеосигнала после такого преобразования потребуется более сложный декодер на приемной стороне, способный обнаружить скрытую синхропоследовательность и заново ее сформировать.

Тактирование микроконтроллера DD1 осуществляется от встроенной петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), опорной частотой для которой является сигнал бортового кварцевого генератора, работающего с элементами ZQ1, C8, C10, R2.

Питание цепей напряжением +5 В осуществляется с помощью стабилизатора VR1, в качестве которого используется модуль понижающего DC/DC преобразователя на микросхеме CN3903. Во входной цепи этого преобразователя включен резистор R1, а на выходе – защитный стабилитрон VD1. В случае отказа (пробоя) преобразователя VR1 происходит лавинный пробой VD1, что ограничивает напряжение на шине +5 В. Далее из-за большого протекающего тока произойдет перегрев резистора R1 и его последующий обрыв. Это предотвратит дальнейшее повреждение элементов схемы за счет ее обесточивания.

Напряжение +5 В используется для питания сервоприводов при их наличии.

Получение стабильного напряжения +3,3 В осуществляется с помощью стабилизатора VR2. Напряжение +3,3 В используется также для питания модулей ультразвуковых дальнометров (при их наличии).

Напряжение батареи измеряется бортовым АЦП DD1 посредством делителя R6R5 с фильтрующим конденсатором C16. Предусмотрена также возможность измерения двух внешних аналоговых сигналов (контакты A1, A2) с напряжением 0...+3,3 В путем подачи их на входы АЦП DD1 через фильтры R9C13 и R8C15 соответственно. Типовое применение аналоговых входов – измерение тока потребления контроллера двигателя (ESC – Electronic Speed Controller).

Программное обеспечение DD1 обеспечивает обработку данных, поступающих с акселерометра, гироскопа, магнитометра, барометра, приемника команд, аналоговых входов и формирование выходных сигналов управления двигателями, сервоприводами, дискретными выходами. Алгоритм работы в экспериментальном образце изделия жестко определен вариантом прошивки.

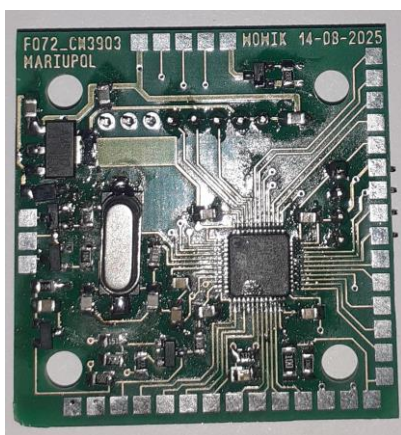
Ниже приведена сводная таблица 1 конфигураций контактов изделия, возможных к реализации.

Примечание: сигналы PWM Servo – это выходы ШИМ с частотой 50 Гц; I²C – сигналы шины I²C для подключения внешних устройств.

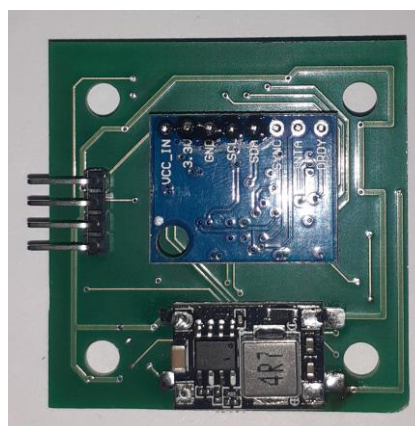
На Рис.5 приведено фото платы описанного контроллера управления беспилотными аппаратами.

Таблица 1 – Варианты конфигурации сигналов разработанного контроллера

Контакт на плате	Сигнал, основная конфигурация	примечание	альтернативная конфигурация 1	альтернативная конфигурация 2
M1	M1	Тип сигнала устанавливается для группы M1-M4: PWM или DShot300		
M2	M2		TX1	
M3	M3		RX1	
M4	M4			
M5	M5	Тип сигнала устанавливается для группы M5-M8: PWM или DShot300	RX2	
M6	M6			
M7	M7		TX3	
M8	M8		RX3	
E1	ECHO1	Дальномер 1	PWM Servo1	
T1	TRIG1		P8	
E2	ECHO2	Дальномер 2	PWM Servo2	I ² C
T2	TRIG2		P9	
R1	RX1	UART1	PWM Servo3	
T1	TX1		PWM Servo4	
R2	RX2	UART2	M8	
T2	TX2		M7	
P1	P1	Дискретные выходы		
P2	P2			
P3	P3			
P4	P4			
P5	P5			
P6	P6		TX2	
A1	AIN1	Потребляемый ток ESC		
A2	AIN2	Аналоговый вход		



а)



б)

Рис.5 – Внешний вид печатной платы (с двух сторон) разработанного контроллера

При написании кода для DD1 широко использовались приемы программирования и оптимизации, обеспечивающие максимальное быстродействие, в частности, использование вычислений с фиксированной запятой, выполнение кода из ОЗУ, динамическая реприоритизация прерываний, широкое использование контроллера прямого доступа к памяти, динамическая реконфигурация выводов микроконтроллера, активное использование непосредственных аппаратных связей между бортовыми периферийными модулями.

Габариты печатной платы разработанного изделия составляют 44×43 мм, что, например, позволяет устанавливать его на раму FPV БПЛА.

Заключение.

Предложено схемное решение и разработано программное обеспечение простого контроллера беспилотного аппарата с минимальным функционалом, позволяющим обеспечить решение прикладных задач. Изделие спроектировано с оптимизацией по минимуму себестоимости, имеет выходы ШИМ и последовательные порты для связи с внешними устройствами. Реализована также возможность шифрования видеосигнала путем инверсии и скрытия синхроимпульсов. Применение разработанного контроллера может позволить расширить круг решаемых беспилотными аппаратами задач за счет минимизации их себестоимости.

Дальнейшим направлением работы является модификация программного обеспечения контроллера для повышения универсальности и расширения области применения. Перспективными задачами представляются следующие:

- реализация гибкой (в т.ч. автоматической) настройки ПИД-регуляторов;
- реализация возможности изменения конфигурации сигналов без перепрошивки контроллера и создание ПО для удобного конфигурирования с персонального компьютера;
- введение режима удержания высоты по барометру;
- введение режима полета по магнитному азимуту.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

Библиографический список.

1. SpeedyBee F405 V3 30x30 Flight Controller : Zhuhai KuaiFeng Technology Co., Ltd. – 2025. – URL: <https://www.speedybee.com/speedybee-f405-v3-30x30-flight-controller/> (дата обращения: 31.10.2025).
2. STM32F405xx STM32F407xx Datasheet : STMicroelectronics. – 2025 – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (date of request: 06.11.2025).
3. MAX7456 Single-Channel Monochrome On-Screen Display with Integrated EEPROM Datasheet : EHAM.RU. – 2008. – URL: <https://www.eham.ru/datasheets/pdf-data/2672409/MAXIM/MAX7456.html> (date of request: 08.11.2025).
4. Landa Chris. DSHOT - the missing Handbook : Brushless Whoop. – 2021. – URL: <https://brushlesswhoop.com/dshot-and-bidirectional-dshot/> (date of request: 03.11.2025).

5. STM32F072x8 STM32F072xB Datasheet : STMicroelectronics. – 2019. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f072c8.pdf> (date of request: 06.11.2025).
6. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification // InvenSense – 2013. – URL: http://plehan.bget.ru/attachments/article/2/MPU-6050_spec.pdf (date of request: 08.11.2025).
7. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883 : Datasheet4u. – 2010. – URL: <https://datasheet4u.com/datasheets/Honeywell/HMC5883/795536> (date of request: 03.11.2025).
8. BMP180 Digital pressure sensor Datasheet : Voltbro. – 2013. – URL: <http://docs.voltbro.ru/gorocket/devices/BMP180-datasheet.pdf> (date of request: 03.11.2025).
9. MC44BS373CA Datasheet. // EHAM.RU. – 2004. – URL: <https://www.eham.ru/datasheets/pdf-data/2891615/FREESCALE/MC44BS373CA.html> (date of request: 06.11.2025).
10. ГОСТ 7845-92. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений. Введ. 01.01.1993. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 27 с.
11. Martin S. Understanding Video Timing with Digital Video Encoders / S. Martin // Intersil Technical Brief TB368. – 1998. – Vol. 6 – 3 p.

¹Бурлака Владимир Владимирович, д-р техн. наук, доцент, директор Научно-технического центра, vburlaka@rambler.ru, Россия, Мариуполь, ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет» – филиал НИУ МГСУ

²Гулаков Сергей Владимирович, д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник, gulakov.s.v@yandex.ru, Россия, Мариуполь, ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет» – филиал НИУ МГСУ

³Головин Андрей Юрьевич, младший научный сотрудник, a.golovin@tms-2022.ru, Россия, Мариуполь, ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет» – филиал НИУ МГСУ

Burlaka Vladimir Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, vburlaka@rambler.ru, Russia, Mariupol, Pryazovskyi State Technical University – branch of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering

Gulakov Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, gulakov.s.v@yandex.ru, Russia, Mariupol, Pryazovskyi State Technical University – branch of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering

Golovin Andrey Yurievich, Research Assistant, a.golovin@tms-2022.ru, Russia, Mariupol, Pryazovskyi State Technical University – branch of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering

АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Грушун А.И.¹, Грушун Т.А.², Осадченко А.Е.³

ANALYSIS OF PERIODIC MODES IN A NONLINEAR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN INDUSTRIAL ROBOT

Grushun A.I.¹, Grushun T.A.², Osadchenko A.E.³

Аннотация. Рассматривается алгебраический метод параметрического анализа периодических режимов в нелинейной системе автоматического управления (НСАУ) промышленного робота. Классическое решение такой задачи на ЭВМ требует многократного построения и анализа кривых частотных годографов. Предлагается определять возможность существования периодических режимов в НСАУ без непосредственного построения частотных годографов 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 analysis of periodic modes in a nonlinear automatic control system (NACS) of an industrial robot is considered. The classical solution of such a problem on a computer requires multiple construction and analysis of frequency hodograph curves. It is proposed to determine the possibility of the existence of periodic modes in the NACS without directly constructing frequency hodographs using positive real roots of specially constructed algebraic equations. Calculating positive real roots, unlike calculating complex roots, is not difficult.

Ключевые слова. Промышленный робот, нелинейная система автоматического управления, периодический режим, положительные вещественные корни.

Keywords. Industrial robot, nonlinear automatic control system, periodic modes, positive real roots.

Постановка проблемы.

При настройке регулятора НСАУ промышленного робота возникает задача выделения «запретной» области в пространстве его варьируемых параметров, внутри которой возможны существования периодических режимов [1,5,11]. Для решения задачи обычно используется классический, но машинно-адаптированный метод гармонической линеаризации, в основе которого лежит построение и поточечный анализ частотного годографа и обратной амплитудно-фазовой характеристики [1,5,6,10]. Такая реализация этого метода для НСАУ, имеющих высокий порядок и сложную структуру, может столкнуться с существенной проблемой выбора шага и диапазона изменения частоты.

Целью статьи является разработка компьютерного метода

построения областей периодических режимов в пространстве двух варьируемых параметров настройки НСАУ промышленного робота на основе метода гармонической линеаризации [1,5,6] по действительным нулям особым образом построенных многочленов, то есть не требующего многократного построения частотных кривых.

Следует отметить, что такой алгебраический подход к решению задач автоматического управления может быть применим для построения областей устойчивости и качества САУ [8], анализа косвенных показателей качества [2] и абсолютной устойчивости НСАУ [3].

Будем исследовать НСАУ электропривода (ЭП) промышленного робота [4,7,9], структурная схема которой [7] приведена к виду, изображенному на Рис.1.

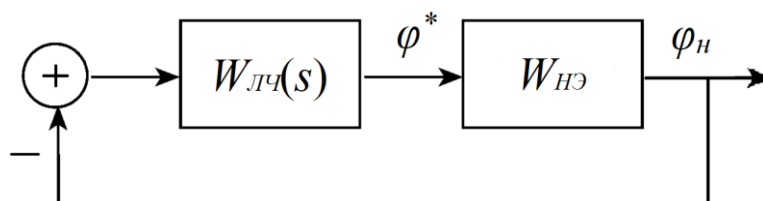


Рис.1 – Структурная схема НСАУ ЭП промышленного робота

На Рис.1: $W_{ЛЧ}(s)$ – передаточная функция линейной части системы; $W_{НЭ}$ – эквивалентная передаточная функция гармонически линеаризованного нелинейного элемента (НЭ); φ^* – угол поворота вала механической передачи; φ_n – угол поворота звена робота [7].

НЭ (существенная нелинейность) возникает из-за того, что угол поворота звена робота одинаково ограничен в обе стороны от центрального положения (продольной оси предыдущего звена) и имеется люфт в механической передаче (редукторе). То есть на выходе редуктора возникает типовая нелинейность с зоной нечувствительности и насыщением (Рис.2).

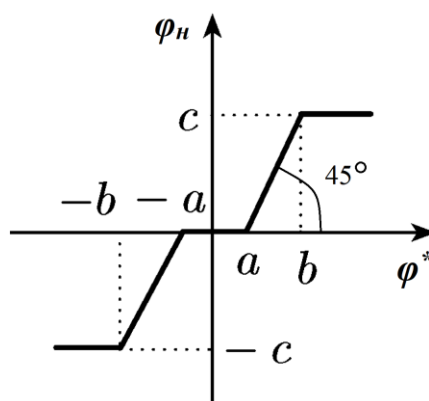


Рис.2 – Типовая нелинейность с зоной нечувствительности и насыщением

Рассмотрим построение области изменения параметров k_p и T_p настройки регулятора положения с передаточной функцией $W(s)=k_p/(T_p s+1)$ [7] НСАУ ЭП промышленного робота [7], внутри которой возможно возникновение устойчивых периодических режимов.

В основе предлагаемого решения задачи лежит алгебраическая интерпретация частотного метода гармонической линеаризации анализа

периодических режимов в НСАУ. Идея метода гармонической линеаризации была предложена Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым. Применительно к системам автоматического управления этот метод разработан Л.С. Гольдфарбом и Е.П. Поповым. Он позволяет определить условия существования и параметры возможных периодических процессов в НСАУ.

Эквивалентные передаточные функции НЭ получаются с помощью гармонической линеаризации. Такие модели для большинства типовых нелинейностей приводятся в справочниках по теории автоматического управления. Для нелинейности, изображенной на Рис.2, эквивалентная передаточная функция $W_{НЭ}$ определяется формулой [1,5,6]:

$$W_{НЭ}(A) = \frac{2c}{\pi(b-a)} \left[\arcsin \frac{b}{A} - \arcsin \frac{a}{A} + \frac{b}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2} \right], \quad (1)$$

где A – амплитуда гармонического сигнала на входе нелинейного элемента, $A \geq b$, $c=b-a$.

Передаточную функцию линейной части системы запишем следующим образом:

$$W_{ЛЧ}(s) = \frac{r(s) + k_p m(s) + T_p d(s)}{c(s) + k_p b(s) + T_p a(s)}, \quad (2)$$

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. Определяем интервалы периодических режимов параметра k_p , $k_p \in [k_{pmin}, k_{pmax}]$ при условии, что параметр T_p дискретно изменяется на величину $\Delta T_p \rightarrow 0$, $T_p \in [T_{pmin}, T_{pmax}]$, где k_{pmin} , k_{pmax} , T_{pmin} и T_{pmax} задаются исходя из технических требований к настройке системы. То есть решение задачи сводится к многократному построению искомых интервалов при фиксированных значениях T_p (Рис.3). С учетом этого передаточная функция (2) примет вид:

$$W_{ЛЧ}(s) = \frac{f(s) + k_p m(s)}{z(s) + k_p b(s)}, \quad (3)$$

где

$$f(s) = r(s) + T_p d(s), z(s) = c(s) + T_p a(s).$$

На Рис.3 интервалы периодических режимов при фиксированных значениях T_p показаны выделенными отрезками, совокупность которых и дает область периодических режимов НСАУ в пространстве параметров k_p и T_p .

При использовании метода гармонической линеаризации должна выполняться гипотеза фильтра низких частот для линейной части системы.

В НСАУ ЭП промышленного робота она выполняется.

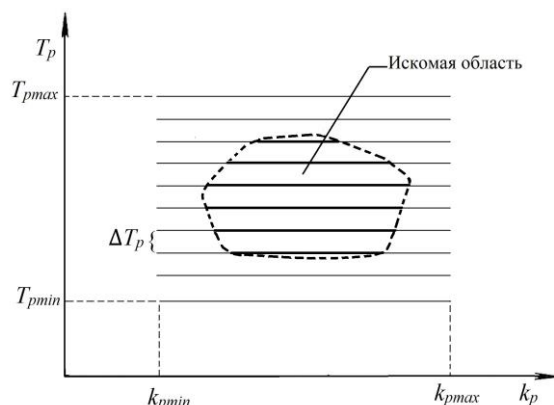


Рис.3 – Построение области периодических режимов НСАУ промышленного робота

Известно, что в линейной системе может возникнуть периодический процесс, если ее характеристическое уравнение имеет чисто мнимые корни [1,5,6]. По критерию Найквиста это означает, что частотный годограф разомкнутой системы проходит через точку $(-1, j0)$, то есть если выполняется равенство [6,10]

$$W_{НЭ}(A)W_{ЛЧ}(j\omega) = -1. \quad (4)$$

Равенство (4) определяет основное условие возникновения периодических процессов в рассматриваемой НСАУ.

Уравнение (4) можно решить графически. Для этого его необходимо представить следующим образом [1,6,7]:

$$W_{ЛЧ}(j\omega) = -\frac{1}{W_{НЭ}(A)}. \quad (5)$$

Строим частотный годограф $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и отрицательную обратную амплитудно-фазовую характеристику $-1/W_{НЭ}(A)$. При построении частотной кривой $W_{ЛЧ}(j\omega)$ изменяем частоту ω , а при построении графика функции $-1/W_{НЭ}(A)$ — амплитуду A . Если указанные характеристики пересекаются, то уравнение (5) имеет решение, что говорит о существовании периодического режима.

Гармонически линеаризованная передаточная функция НЭ (1) является вещественной функцией, следовательно, отрицательная обратная характеристика $-1/W_{НЭ}(A)$ полностью располагается на действительной оси комплексной плоскости, и для определения ее местоположения достаточно лишь небольшого количества точек. Таким образом, существование периодических режимов определяется наличием точек пересечения годографа $W_{ЛЧ}(j\omega)$ с действительной осью на интервале значений функции $-1/W_{НЭ}(A)$.

Рассмотрим, как с помощью алгебраического анализа годографа $W_{ЛЧ}(j\omega)$ без непосредственного его построения выявить существование периодических режимов в рассматриваемой НСАУ при некоторых фиксированных значениях параметров k_p и T_p из заданной области поиска.

Подставив эти значения в передаточную функцию (2), запишем ее следующим образом:

$$W_{ЛЧ}(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (6)$$

где

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

Заменяя в (6) оператор Лапласа s на мнимую переменную $j\omega$, получим частотную передаточную функцию:

$$W_{ЛЧ}(j\omega) = \frac{R_u(\omega)}{Z(\omega)} + j \frac{R_v(\omega)}{Z(\omega)}, \quad (7)$$

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

Для вычисления частот пересечения годографа линейной части $W_{ЛЧ}(j\omega)$ с действительной осью достаточно решить уравнение:

$$\frac{R_v(\omega)}{Z(\omega)} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) сводится к решению двух уравнений:

$$R_v(\omega) = 0 \quad (9)$$

и

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

Определяем положительные вещественные корни этих уравнений. Из корней уравнения (9) удаляем корни, совпадающие с корнями уравнения (10) если таковые имеются, с учетом их кратностей. Оставшиеся корни (9) заносим в специальное множество M . Периодических режимов в НСАУ может быть несколько, поэтому может быть несколько положительных вещественных корней (9), соответствующих частотам пересечения годографа $W_{ЛЧ}(j\omega)$ с действительной осью.

Если множество M пустое, то периодических режимов в системе нет.

Если множество $M = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, то для каждой частоты ω из множества M необходимо проверить выполнение условия:

$$g_{\min} \leq \frac{R_u(\omega_i)}{Z(\omega_i)} \leq g_{\max}, i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где $g_{\min}$ и $g_{\max}$ – левая и правая предельные границы интервала изменения функции $-1/W_{НЭ}(A)$ соответственно.

В случае невыполнения условия (11) для всех частот ω из множества M делается вывод об отсутствии периодических режимов. В противном

случае периодические режимы в НСАУ присутствуют.

Покажем на примере реализацию описанного метода. Зададим значения [7] параметров передаточных функций системы, а также следующие значения параметров настройки регулятора положения НСАУ ЭП промышленного робота и нелинейного элемента (Рис.2) [7]: $k_p = 100$, $T_p = 0,001$ с, $a = 0,002$ рад, $b = 1,0492$ рад, $c = 1,0472$ рад. Преобразовав исходную структурную схему САУ [7] к виду, изображенному на Рис.1, получаем передаточную функцию (6) линейной части:

$$W_{ЛЧ}(s) = \frac{280s + 14000}{0,000000042s^6 + 0,00005705s^5 + 0,01548s^4 + 0,4757s^3 + 42,41s^2 + 686s} \quad (12)$$

Графическое решение уравнения (5) представлено на Рис.4.

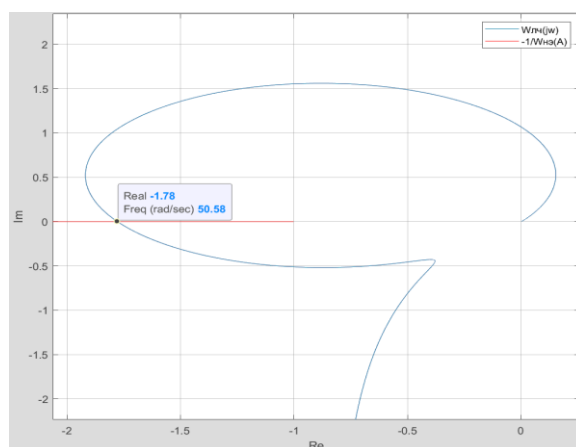


Рис.4 – Графическое определение периодического режима в НСАУ ЭП промышленного робота

По Рис.4 видно, что частотный годограф $W_{ЛЧ}(j\omega)$ и график функции $-1/W_{НЭ}(A)$ пересекаются. Это говорит о существовании периодического режима с частотой колебаний $50,58$ рад/с $= 8,0501$ с $^{-1}$ (Рис.4).

Построив переходный процесс в НСАУ, убеждаемся, что он имеет незатухающие колебания с частотой $8,046$ с $^{-1}$ (Рис.5).

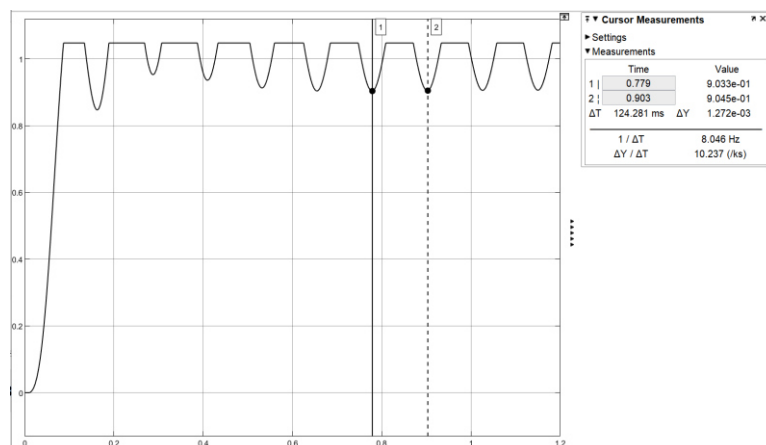


Рис.5 – Переходный процесс в НСАУ ЭП промышленного робота

Теперь решим задачу с помощью рассмотренного алгебраического метода. Выполнив на компьютере требуемые расчеты, получаем для передаточной функции (12) линейной части ее частотную передаточную функцию $W_{ЛЧ}(j\omega)$, а также уравнения (9) и (10).

Частотная передаточная функция линейной части системы имеет вид:

$$W_{ЛЧ}(j\omega) = \frac{-0,000588\omega^6 + 83,524\omega^4 - 401660\omega^2}{1,764 \cdot 10^{-15}\omega^{12} + 1,95438 \cdot 10^{-9}\omega^{10} + 1,8891547 \cdot 10^{-4}\omega^8 - 1,00845099999\omega^6 + 1145,947699999\omega^4 + 470596,0\omega^2} + j \frac{-0,00001176\omega^7 + 3,5357\omega^5 - 5215\omega^3 - 9603999\omega}{1,764 \cdot 10^{-15}\omega^{12} + 1,95438 \cdot 10^{-9}\omega^{10} + 1,8891547 \cdot 10^{-4}\omega^8 - 1,00845099999\omega^6 + 1145,947699999\omega^4 + 470596,0\omega^2} \quad (13)$$

Уравнения (9) и (10) для исследования НСАУ, соответственно, имеют вид:

$$-0,00001176\omega^7 + 3,5357\omega^5 - 5215\omega^3 - 9603999\omega = 0, \quad (14)$$

$$1,764 \cdot 10^{-15}\omega^{12} + 1,95438 \cdot 10^{-9}\omega^{10} + 1,8891547 \cdot 10^{-4}\omega^8 - 1,00845099999\omega^6 + 1145,947699999\omega^4 + 470596,0\omega^2 = 0. \quad (15)$$

Определяем положительные вещественные корни уравнения (14). Уравнение (14) имеет два положительных вещественных корня $\omega_1 = 50,58092437$ и $\omega_2 = 546,95825104$. По графикам на Рис.4 видно, что значение корня ω_1 совпадает с частотой, на которой годограф $W_{ЛЧ}(j\omega)$ пересекается с функцией $-1/W_{НЭ}(A)$. Уравнение (15) для исследования системы, соответствующее уравнению (10), положительных вещественных корней не имеет. Подставив корни ω_1 и ω_2 уравнения (14) в действительную часть частотной передаточной функции (13), получаем значения $d_1 = \text{Re}W_{ЛЧ}(j\omega_1) = -1,774$ и $d_2 = \text{Re}W_{ЛЧ}(j\omega_2) = 0,00005414$. Согласно неравенству (11), для выполнения условия существования периодических режимов необходимо, чтобы значения d_1 и d_2 принадлежали интервалу на действительной оси $(-\infty, g_{\max}]$, где $g_{\max} = -1/W_{НЭ}(b) = -1,0024376$, $b = 1,0492$ – параметр нелинейности (Рис.2). Значение d_1 принадлежит указанному интервалу, а d_2 – нет. Следовательно, в системе существует один периодический режим, что полностью подтверждается графиками на Рис.4.

Очевидно, что предлагаемый алгебраический подход к анализу периодических режимов в НСАУ показал хорошую эффективность. На практике для получения решения достаточно определять положительные вещественные корни только уравнения (9), что существенно ускоряет и упрощает выполнение задачи.

Для построения на ЭВМ областей периодических режимов в пространстве двух варьируемых параметров k_p и T_p регулятора положения

НСАУ ЭП промышленного робота был разработан алгоритм.

1. Задаем минимальное значение T_{pmin} , максимальное значение T_{pmax} , шаг изменения ΔT_p параметра T_p (Рис.3); минимальное значение k_{pmin} , максимальное значение k_{pmax} , шаг h поиска периодического режима по параметру k_p на интервале $k_p \in [k_{pmin}, k_{pmax}]$ при фиксированном значении T_p ; задаем текущее значение параметра $T_p = T_{pmin}$.

2. Для текущего значения параметра T_p формируем передаточную функцию (3).

3. В рамках границ интервала $k_p \in [k_{pmin}, k_{pmax}]$ дискретно изменяем параметр регулятора k_p на величину шага h . На каждом шаге (в точках) по передаточной функции (3) формируем передаточную функцию (6), для которой с помощью рассмотренной выше методики проверяем наличие периодических режимов. Множество точек изменения параметра k_p , в которых существуют периодические режимы, образует искомый интервал НСАУ.

4. Задаем новое (текущее) значение параметра $T_p = T_p + \Delta T_p$. Выполняем проверку: если $T_p > T_{pmax} + \Delta T_p / 2$, то процесс построения области периодических режимов НСАУ завершается, иначе переходим к пункту 2.

Выводы.

Применение предлагаемого метода позволяет:

- полностью формализовать алгоритм решения задачи;
- гарантировать результат;
- повысить сложность моделей исследуемых НСАУ промышленных роботов.

Задачей дальнейших исследований является усовершенствование разработанного метода и алгоритма, позволяющее определять характеристики периодических режимов (их устойчивость и неустойчивость), а также устойчивость НСАУ промышленных роботов 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. – Севастополь : изд-во СевГТУ, 1996. – № 2. – С. 65-68.
3. Грушун А.И. Параметрический анализ устойчивости судовых нелинейных систем автоматического управления / А.И. Грушун, Т.А. Грушун, А.Е. Осадченко // Морские интеллектуальные технологии. – СПб. : Изд-во НИЦ «Моринтех», 2024. – Т. 63. – № 1. – С. 234-240.
4. Егоров И.Н. Системы управления электроприводов технологических роботов и манипуляторов / И.Н. Егоров, В.П. Умнов. – Владимир : изд-во ВлГУ, 2022. – 314 с.
5. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование / Н.Н. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1978. – 736 с.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. – М. : изд-во Физматлит, 2016. – 440 с.

7. Макаров И.М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. Приводы робототехнических систем / И.М. Макаров, С.В. Пантюшин, В.М. Назаретов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1986. – 175 с.
8. 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.
9. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов / Ю.М. Сафонов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 175 с.
10. Kuo B.C. Automatic control systems / B.C. Kuo, M.F. Golnaraghi. – NJ, USA : Wiley Hoboken, 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»

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

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Шаталова Ю.Г.¹, Чаленков Н.И.², Пестрякова А.В.³

ANALYSIS OF MODELS FOR IMPLEMENTING A DISTRIBUTED DATABASE IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Shatalova J.G.¹, Chalenkov N.I.², Pestryakova A.V.³

Аннотация. В статье анализируется архитектура взаимодействия клиентов и распределённой базы данных промышленного предприятия. Рассматриваются три модели организации взаимодействия. Обосновывается выбор трёхуровневой модели с использованием двух серверов приложений. Осуществляется распределение функций по уровням выбранной модели. Проводится обоснование фрагментации базы данных. Анализируются возможные методы репликации, объясняется выбор классической модели с основной копией. Обосновывается выбор двухфазного метода синхронизации данных на узлах базы. Разрабатывается система репликации и синхронизации распределённой базы данных предприятия.

Abstract. The article analyzes the architecture of interaction between clients and a distributed database of an industrial enterprise. Three models of interaction organization are considered. The choice of a three-tier model using two application servers is substantiated. The distribution of functions across the levels of the chosen model is carried out. The justification of database fragmentation is provided. Possible replication methods are analyzed, and the choice of a classical model with a master copy is explained. The choice of a two-phase method for synchronizing data on database nodes is substantiated. A system for replicating and synchronizing the distributed database of an enterprise is developed.

Ключевые слова. Распределённая база данных, сервер приложений, методы синхронизации, репликация данных.

Keywords. Distributed database, application server, synchronization methods, and data replication.

Введение.

База данных (БД) лежит в основе любой информационной системы. Если же речь идёт о промышленном предприятии, то база данных является его информационно-логической моделью [1-3]. В связи с большим объёмом данных промышленного предприятия, хранящихся в БД, значительного числа пользователей, а также географической распределённости производства, решение о разработке распределённой базы данных (РБД) для рассматриваемого предприятия является целесообразным. При разработке базы данных необходимо решить множество промежуточных задач. Необходимо выбрать и обосновать архитектуру системы, методы репликации и синхронизации данных, решить задачи распределения функций по уровням системы и

фрагментации данных.

Целью работы является построение системы распределённой базы данных предприятия, обеспечивающей выполнение всех требований к РБД: надежность, актуальность, непротиворечивость данных, быстродействие, гарантированное обслуживание запросов клиентов и т.д. Для реализации цели необходимо выбрать архитектуру системы базы данных, распределить функции по уровням выбранной модели, выполнить фрагментацию данных по узлам РБД, выбрать и обосновать методы репликации и синхронизации данных.

Выбор и обоснование модели реализации распределённой базы данных предприятия.

Как бы ни была организована распределённая база данных, в основе ее работы лежит парадигма «клиент-сервер». Однако, в зависимости от выбора количества уровней в системе РБД и принципа распределения реализуемых в системе функций между уровнями системы, выделяют три модели: модель доступа к удалённым данным, модель сервера базы данных, модель сервера приложений [1,4]. Кроме того, к понятию модели реализации РБД относятся выбор принципов фрагментации данных, выбор методов репликации и синхронизации данных [5,6].

Для проектируемой распределённой системы управления промышленным предприятием был проведён сравнительный анализ трёх архитектурных моделей распределённых систем [4]:

- модель доступа к удалённым данным (Remote Data Access (RDA));
- модель сервера базы данных (DataBase Server (DBS));
- модель сервера приложений (Application Server (AS)).

Сравнение моделей:

– RDA-модель предполагает выполнение бизнес- логики на клиентских рабочих местах. Это создаёт серьёзные проблемы: необходимость обновлять логику на множестве клиентов, повышенные требования к безопасности, отсутствие централизованного контроля.

– DBS-модель переносит бизнес- логику внутрь СУБД в виде хранимых процедур и триггеров. Несмотря на высокую производительность, этот подход ограничивает гибкость разработки, усложняет модификацию бизнес- правил и жёстко привязывает систему к конкретной реализации базы данных. Также значительно повышается нагрузка на сервер базы данных, что может повлечь снижение надежности системы.

– AS-модель обеспечивает структурное разделение системы на три независимых уровня:

- 1) уровень представления (интерфейс и взаимодействие с пользователем);
- 2) уровень бизнес- логики (правила, алгоритмы и процессы);
- 3) уровень данных (хранение и обеспечение целостности информации).

Такое разделение ответственности является основополагающим принципом проектирования сложных систем, позволяя изолированно разрабатывать, тестировать и масштабировать каждый компонент.

По результатам анализа в качестве базовой архитектуры была выбрана модель сервера приложений (AS-модель).

Выбранная модель обладает следующими достоинствами [1-4]:

- снижается нагрузка на трафик;
- уменьшается нагрузка на сервер базы данных;
- отсутствует дублирование кода приложений, общий код переносится на сервер приложений;
- не прошедшие авторизацию запросы отбрасываются до их поступления на сервер базы данных, что позволяет не рассматривать такие запросы;
- клиентские приложения не зависят от конкретной СУБД, что увеличивает переносимость системы и ее масштабируемость.

Для исследования модели сервера приложений были построены математическая и имитационная модели [4,5]. На основе имитационной модели была проанализирована возможность достижения стационарного режима работы рассматриваемой системы и определено количество обрабатывающих устройств, в нашем случае такими устройствами являются серверы приложений. Известно, что для системы с потоком заявок и несколькими обрабатывающими устройствами существование стационарного режима выражается соотношением:

$$\Theta\lambda < NB,$$

где Θ – среднее значение трудоемкости выполнения задания; λ – интенсивность потока заявок; N – количество обрабатывающих устройств; B – быстродействие обрабатывающего устройства [4].

Проведенные расчёты и анализ работы имитационной модели, позволили сделать вывод о необходимости использования двух серверов приложений.

Таким образом, для реализации распределённой базы данных рассматриваемого промышленного предприятия была выбрана трёхуровневая модель сервера приложений, с двумя серверами промежуточного уровня.

Обоснование распределения функций РС по уровням.

В соответствии с выбранной AS- моделью функциональные обязанности проектируемой системы распределяются между её тремя логическими уровнями:

- клиентский уровень отвечает за визуализацию пользовательского интерфейса, первичный захват и валидацию пользовательского ввода;
- уровень сервера приложений является управляющим ядром системы. Здесь реализуется бизнес- логика предметной области. Сервер приложений выполняет координацию запросов, управление пользовательскими сессиями, обеспечение атомарности распределённых транзакций;
- уровень сервера базы данных специализируется на надёжном и безопасном хранении информации. Его функции включают обеспечение неизменяемости данных, поддержание их целостности, реализацию механизмов безопасности и эффективное выполнение SQL- запросов. Кроме того, на этом уровне реализуются инфраструктурные функции: репликация данных, резервное копирование, восстановление после сбоев и т.д. [4,5].

Такое распределение функций создаёт архитектуру с высокой

степенью надежности и производительности. Позволяет снизить нагрузку на серверы базы данных, повысить степень защищённости данных. Это позволяет достичь ключевых целей проектирования: простоты модификации, эффективного использования ресурсов и устойчивости системы к изменениям и масштабированию [6].

Выбор схемы фрагментации РБД.

Фрагментация предполагает разбиение базы данных или таблиц на части и дальнейшее хранение этих частей на различных узлах РБД. При фрагментации должны выполняться следующие требования [1,6]:

- полнота (при объединении фрагментов не должен быть потерян ни один кортеж БД);
- восстановимость (должна обеспечиваться возможность восстановления отношения из его фрагментов);
- непересекаемость (фрагмент не должен входить в различные части БД).

Для проектируемой базы данных наиболее подходящей является фрагментация, основанная на разнесении по различным узлам таблиц базы. Это обусловлено тем, что хранящаяся в таблицах информация должна быть расположена ближе к потенциальным пользователям. Схема базы данных (представлена на Рис.1) построена таким образом, что таблицы содержат информацию, относящуюся к конкретным структурам предприятия, например данные о комплектующих относятся к складам, данные о сотрудниках к отделу кадров и т.д. Таким образом, расположение соответствующих таблиц на узлах, расположенных в непосредственной близости к соответствующим подразделениям предприятия снизит трафик в системе, повысит скорость обработки запросов и снизит требования к репликации и синхронизации данных. Фрагментация частей таблиц для рассматриваемой предметной области нецелесообразна.

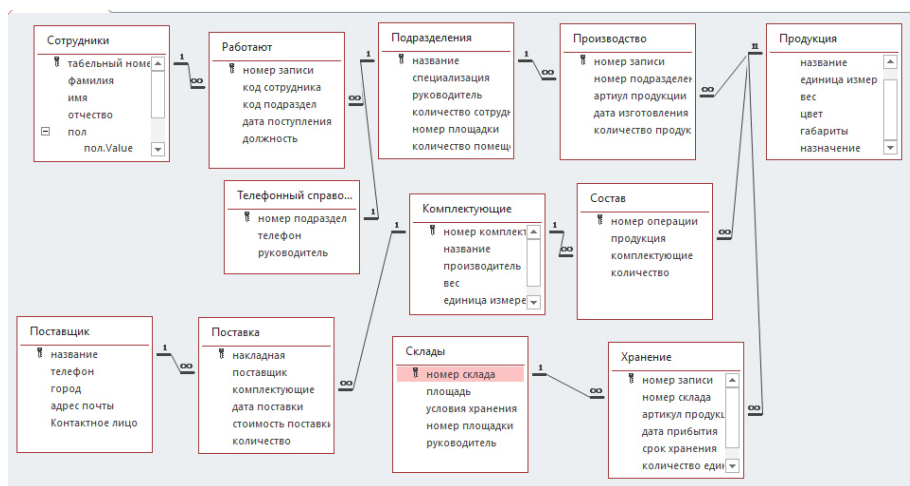


Рис.1 – Схема базы данных

Выбор и обоснование методов репликации РБД.

Репликация данных является одним из ключевых механизмов обеспечения отказоустойчивости, надёжности и масштабируемости распределённых систем. Она позволяет поддерживать несколько идентичных копий базы данных или её частей на разных узлах, что повышает доступность информации и снижает риски потерь при сбоях [7].

Для рассматриваемой системы критически важно поддерживать целостность данных, но при этом система должна обслуживать множество пользователей без значительных задержек [8]. Поэтому необходимо проанализировать существующие методы репликации и выбрать наиболее подходящий для рассматриваемой предметной области.

Методы репликации можно разделить на два типа [7,8]:

1) С основной копией. При таком подходе одна копия данных назначается основной (или ведущей), а остальные узлы выступают в роли резервных копий. Любые изменения сначала применяются к основной копии, после чего распространяются на резервные копии. Преимуществами подхода являются: простота реализации, четкое разделение ролей, минимизация конфликтов версий, быстрая запись изменений. К недостаткам следует отнести: зависимость от основного узла, снижение производительности записи при большом количестве узлов, возможность потери данных в случае отказа ведущего сервера.

2) Без основной копии. Этот метод предполагает отсутствие выделенного главного узла, все серверы равноправны и обладают полной версией данных. Запросы чтения и записи могут выполняться на любом узле сети. Это повышает доступность и отказоустойчивость системы, однако усложняет управление конфликтами версий. Преимущества подхода: высокая доступность, равномерное распределение нагрузки, низкая задержка запросов. Недостатки: сложность обработки конфликтов данных, требуется поддержка механизмов разрешения коллизий, сложность синхронизации.

Исходя из особенностей предметной области, для рассматриваемой РБД наиболее подходит реализация репликации с основной копией, поскольку логика базы данных предприятия подразумевает хранение данных на узлах, территориально близких к основным пользователям этих данных. Эти узлы являются ключевыми при внесении изменений в БД.

Известны следующие методы репликации с основной копией [8-10]:

1) классический подход. В основную копию вносятся изменения, остальные используются только для чтения. Этот метод обеспечивает простоту управления и централизованный контроль обновления данных, однако зависимость от главного узла снижает надежность;

2) асимметричная репликация. Основная копия фрагментирована и распределена по узлам, другие узлы подписываются на отдельные фрагменты (read only). Обеспечивается гибкость, возможность локализации данных, но возникает сложность администрирования и поддержания целостности данных;

3) рабочий поток. Право обновления переходит от одной копии к другой в соответствии с потоком операций; одновременно обновляется только одна копия. Этот подход исключает конфликты при одновременных обновлениях и поддерживает консистентность данных, но требуется строгий контроль порядка обновлений. Также возможно замедление операций записи из-за ожидания передачи права на обновление;

4) консолидация данных. Данные из разных копий объединяются в одну основную. Для этого подхода характерно эффективное объединение данных из различных источников, упрощение процессов аналитики и

отчётности. Однако повышается сложность при частых изменениях данных и риск возникновения конфликтов при интеграции данных.

На основании проведенного анализа методов репликации и с учётом требований, предъявляемых к РБД анализируемого предприятия, оптимальным выбором является репликация с основной копией по классическому подходу. Она обеспечивает централизованный контроль изменений, упрощает администрирование и снижает вероятность конфликтов при обновлении. При этом чтение данных может выполняться с реплик, что повышает производительность системы при большом числе пользователей.

Таким образом, выбранный метод репликации обеспечивает баланс между надёжностью и безопасностью работы распределённой базы данных.

Анализ методов синхронизации в РС.

Синхронизация в распределённых системах необходима для согласованного доступа к данным и предотвращения конфликтов при параллельных операциях.

Для выбора наиболее подходящего для разрабатываемой системы метода синхронизации, проведём анализ известных подходов [1,10]:

1) протокол двухфазной фиксации (2ФФ). Координатор управляет фиксацией транзакции через фазы голосования и решения. Метод обеспечивает атомарность транзакций и непротиворечивость, используется легко реализуемый протокол; однако, может возникнуть большая задержка и снижение надёжности в случае отказа координатора;

2) метод блокировок. Создаются специальные механизмы защиты-блокировки (locks), которые накладываются на объекты базы данных, запрещая другим транзакциям изменять заблокированные элементы. Метод предотвращает возникновение аномалий, обеспечивая изоляцию транзакций друг от друга. При этом возможно возникновение взаимоблокировки (deadlock) транзакций. Долгосрочные блокировки снижают общую производительность системы, увеличивая конкуренцию за ресурсы;

3) метод временных меток. Каждой транзакции присваивается временная метка; порядок выполнения определяется метками. Методу присущи отсутствие блокировок и простота реализации, но требуется точная синхронизация времени узлов.

На основании проведённого анализа, для проектируемой системы выбран протокол двухфазной фиксации (2ФФ). Данный выбор обусловлен следующими факторами:

– требования к атомарности операций. Ключевые бизнес-процессы системы (например, перевод сотрудника между подразделениями, информация о поставках и производстве) являются распределёнными транзакциями, которые должны выполняться атомарно на всех затронутых узлах. Только 2ФФ гарантирует, что такая операция либо завершится на всех узлах, либо будет полностью отменена;

– критичность целостности данных. В системе управления предприятием недопустимы ситуации частичного выполнения транзакций или несогласованности данных между узлами. 2ФФ обеспечивает строгую согласованность, что является обязательным требованием для кадрового и

финансового учёта;

– приемлемость производительности. Хотя 2ФФ имеет более высокую задержку по сравнению с другими методами, критичные для целостности операции в системе (например, кадровые перемещения) выполняются относительно редко и не требуют максимальной производительности в ущерб надёжности.

Метод временных меток не подходит из-за требований к синхронизации времени и рисков при высокой конкуренции за данные. Метод блокировок эффективен в пределах одного узла, но не обеспечивает атомарности для распределённых транзакций.

Таким образом, протокол двухфазной фиксации является оптимальным выбором для обеспечения надёжности и целостности данных в распределённой системе.

На основании проведенного анализа и выбранных методов репликации и синхронизации был разработан программный комплекс. Структурная схема взаимодействия подсистем программного комплекса представлена на Рис.2.



Рис.2 – Структурная схема взаимодействия подсистем

Заключение.

В данной работе был проведён анализ построения системы распределённой базы данных промышленного предприятия. Был обоснован выбор трёхуровневой модели РБД, выполнено распределение функций по уровням и выбрана схема фрагментации. Для организации корректной работы базы данных был выбран метод репликации с основной копией по классическому подходу и протокол двухфазной фиксации (2ФФ) транзакций. На основании выбранных методов была разработана программная система репликации и синхронизации РБД промышленного предприятия.

Библиографический список.

1. Дейт К.Д. Введение в системы баз данных / К.Д. Дейт. – 8-е изд. ; пер. с англ. и ред. К.А. Птицына. – М. : Вильямс, 2005. – 1327 с. : ил., табл. – ISBN 5-8459-0788-8.
2. Коннолли Т. Базы данных: проектирование, реализация, сопровождение. Теория и практика / Т. Коннолли, К. Бегг. – 3-е изд. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1440 с.
3. Бойко В.В. Проектирование баз данных информационных систем / В.В. Бойко, В.М. Савинков. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 350 с.
4. Заморенов М.В. Моделирование процесса обработки заявок к распределенной базе данных промышленного предприятия /

- М.В. Заморенов, Ю.Г. Шаталова // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2024. – Т. 25. – № 1. – С. 35-43.
5. Шаталова Ю.Г. Моделирование процесса обработки запросов к распределенной базе данных с использованием сети Петри-Маркова / Ю.Г. Шаталова // Вестник СевНТУ. Серия «Информатика, электроника, связь». Вып. № 31/2012. – Севастополь : Изд. СевНТУ, 2012. – С.67-72.
6. Мандарова О. Современные подходы и проблемы проектирования баз данных: от реляционных моделей к распределённым системам / О. Мандарова, О. Гылыджова, М. Довлетов // Новая экономика: импортозамещение, инновационность, экономическая безопасность: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Оренбург, 04 декабря 2025 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2025. – С. 38-40.
7. Шаталова Ю.Г. Разработка системы репликации для распределенной базы данных предприятия / Я.В. Жиглов, Ю.Г. Шаталова, // Символ науки: международный научный журнал. – 2017. – Т. 2. – № 3. – С. 137-142.
8. Апрыткин М.В. О механизмах репликации в системах распределенных баз данных / М.В. Апрыткин, А.Ю. Золотарев, М.И. Чердынцева // Академия педагогических идей Новация. Серия: Студенческий научный вестник. – 2019. – № 5. – С. 86-90.
9. Кирнос В.Ю. Сравнительный анализ механизмов репликаций данных в различных СУБД / В.Ю. Кирнос, Н.М. Куржангулов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2017. – № 18-1. – С. 84-91.
10. Панфилов А.Н. Об одном методе двусторонней репликации данных в распределённых базах данных / А.Н. Панфилов, А.Ю. Ситникова // Вестник молодёжной науки России. – 2020. – № 4. – 11 с.

¹Шаталова Юлия Георгиевна, канд. техн. наук, доц., доцент, ugshatalova@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

²Чаленков Никита Игоревич, старший преподаватель, nichalenzkov@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

³Пестрякова Анна Вячеславовна, ассистент, pestryakova@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Shatalova Julia Georgievna, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, ugshatalova@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Chalenzkov Nikita Igorevich, Senior Lecturer, nichalenzkov@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

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

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ СЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ
ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ В МАШИНО- И
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Чернега В.С.¹, Карлусов В.Ю.², Лушина В.С.³

**ALTERNATIVE STOCHASTIC NETWORK MODELS IN
PLANNING REPAIR WORK IN MECHANICAL ENGINEERING
AND INSTRUMENTATION**

Chernega V.S.¹, Karlusov V.Yu.², Lushina V.S.³

Аннотация. Рассмотрена возможность использования альтернативных стохастических GERT-сетей для повышения точности оценки длительности ремонтных работ в машино- и приборостроении. Разработана модель GERT-сети обобщенной процедуры ремонта оборудования и получена формула для расчета эквивалентной передаточной функции обобщенной GERT-сети, являющейся основой для определения производящей функции моментов эквивалентной сети, по которой определяется математическое ожидание и дисперсия времени выполнения процедуры ремонта оборудования.

Abstract. The possibility of using alternative stochastic GERT networks to improve the accuracy of estimating the duration of repair work in mechanical engineering and instrument engineering is considered. A model of a GERT network of a generalized equipment repair procedure is developed and a formula is obtained for calculating the equivalent transfer function of the generalized GERT network, which is the basis for determining the generating function of the moments of the equivalent network, according to which the mathematical expectation and variance of the time of performing the equipment repair procedure are determined.

Ключевые слова. GERT-модель процедуры ремонта оборудования, производящая функция моментов эквивалентной сети, математическое ожидание длительности ремонта.

Keywords. GERT model of equipment repair procedure, generating function of moments of equivalent network, mathematical expectation and variance of repair duration.

Постановка задачи.

При планировании ремонтных работ одним из важнейших параметров является длительность ремонта. Технологический процесс ремонта сложных приборов, машин и оборудования представляет собой последовательность разнородных этапов, направленных на восстановление функций ремонтируемого изделия [1,2]. Особенностью этого процесса является то, что последовательность работ по достижению цели ремонта может осуществляться по различным сценариям, т.е. осуществляться по

основным и альтернативным путям. Причем, выбор пути зависит от ряда случайных факторов и осуществляется с некоторой вероятностью, а продолжительность работ, выполняемых на отдельных этапах пути, может варьироваться в некоторых пределах под воздействием случайных возмущений. По завершению некоторого этапа работ по результатам контроля качества его исполнения может возникнуть необходимость возврата и повторения этого этапа несколько раз.

С учетом этих особенностей для оценки продолжительности выполнения ремонтных работ целесообразно использовать направленный альтернативный стохастический сетевой граф. Такой граф является основой метода графической оценки и анализа GERT (англ. *Graphical Evaluation and Review Technique*), который представляет собой альтернативный вероятностный метод сетевого планирования. Этот метод был разработан в 60-х годах прошлого столетия для управления проектами, позволяя с помощью вероятностных методов анализировать как сетевую логику, так и оценивать продолжительность действий в тех случаях, когда затруднительно или невозможно однозначно определить, какие именно работы и в какой последовательности должны быть выполнены для достижения цели проекта [3-5]. В машиностроении GERT-сети начали применяться в начале 2000-х для временного анализа, планирования и прогнозирования различных производственных процессов. Однако информация о применении альтернативных стохастических сетевых моделей для прогнозирования длительности ремонтных работ в машиностроении отсутствует [6-8]. С учетом того, что технология ремонта приборов, машин и оборудования различных типов уникальная, актуальным является разработка обобщенной GERT-модели и метода расчета длительности ремонтных работ.

Целью статьи является разработка альтернативной стохастической обобщенной модели процесса выполнения ремонтных работ в машино- и приборостроении и методики оценки времени ремонта.

При написании данной статьи использованы некоторые результаты авторов при исследовании альтернативных стохастических сетевых моделей в медицине [9,10].

Метод решения.

Построение альтернативной стохастической сетевой модели процесса ремонта оборудования.

GERT-сеть состоит из узлов и соединяющих их ветвей. Математически граф альтернативной стохастической сети (ACC), представляющий собой GERT-сеть, может быть записан в виде [11,12]

$$G = (N, B),$$

где N – множество узлов (вершин), а B – множество направленных ветвей (дуг).

Узел стохастической GERT-сети представляет некоторое состояние системы, а ветви – переходы из одного состояния в другое. Переходы рассматриваются как результат выполнения определенной операции в ходе

ремонтных работ. Кроме входного и выходного узлов в сети имеются внутренние узлы, соответствующие отдельным операциям при ремонте оборудования: «Визуальный осмотр завершен», «Обнаружен дефект», «Проверка завершена», «Сборка окончена» и проч.

Ветвь означает выполнение работы определенного этапа ремонта оборудования (демонтаж подшипниковых крышек, извлечение шпонок, снятие зубчатых колес, измерение регулировочных зазоров и т.п.).

В альтернативных стохастических сетях для перехода в последующее состояние не обязательно выполнение всех дуг, входящих в него, поэтому в них возможно присутствие циклов с возвратом в предыдущие состояния, т.е. наличие петель на графе.

Внутренние узлы состоят из узла входа и узла выхода, с которыми связаны соответствующие входные и выходные функции. Входная функция определяет условия, при которых узел будет выполнен, т.е. будет достигнуто соответствующее состояние, например, «Нарушена герметичность» или «Выкрашивание рабочих поверхностей зубьев». Выходная функция определяет совокупность условий, связанных с результатом выполнения узла, в частности, указывает, должны ли выполняться все операции, которым данный узел непосредственно предшествует, либо только одна из них. В начальном узле выполняется только выходная функция, а в конечном – только входная.

Выходные функции бывают детерминированные и альтернативные стохастические. Отличие альтернативного стохастического узла от детерминированного состоит в том, что у детерминированного узла все ветви, выходящие из узла, выполняются, если узел выполнен, а у вероятностного узла выполняется только одна из ветвей, выходящих из данного узла, при условии реализации состояния этого узла.

В альтернативных стохастических сетях [11,12] определены три типа входных функций. В таблице 1 приведены их типы и условные графические изображения узлов, в которых реализованы эти функции.

В таблице 2 приведены типы и условные графические изображения узлов, в которых реализованы различные выходные функции. Узел с детерминированной функцией изображается полукругом, а с стохастической – треугольником. Альтернативность функции обозначается стрелкой →.

В стохастических альтернативных сетях возможно также комбинирование входных и выходных типов функций.

При моделировании ремонтных работ в большинстве случаев достаточно использования узлов с входной функцией ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и детерминированным выходом, а также узлы с входной функцией ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и вероятностной выходной функцией ИМПЛИКАЦИЯ, реализующей условие «Если-то».

Сети, содержащие только два вида таких узлов, относят к GERT-сетям [11]. GERT-сети являются графическим вариантом полумарковских моделей, но случайные величины в них характеризуется не только дисперсией, но и законом распределения.

Таблица 1 – Обозначение и описание входов узлов стохастической альтернативной сети

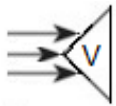
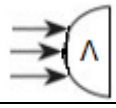
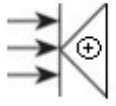
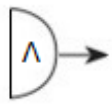
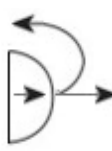
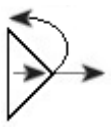
Условное графическое обозначение входа узла	Выполняемая функция	Описание функции
	Дизъюнкция, логическое ИЛИ	Узел выполняется (действие завершено), если выполнена хотя бы одна из работ (ветвей), входящих в этот узел
	Конъюнкция, логическое И	Узел выполняется, если выполнены все работы (ветви), входящие в него
	Исключающее ИЛИ	Узел выполняется, если в определенный момент времени выполнена только одна из работ (ветвей), входящих в этот узел

Таблица 2 – Обозначение типов узлов и выполняемых ими функций

Условное графическое обозначение типа узла	Тип и выполняемая функция	Описание функции
	Детерминированная, И	Каждое исходящее действие имеет вероятность, равную 1, что означает, что каждое из них будет выполнено
	Детерминированная, ИМПЛИКАЦИЯ (Если-то)	Если выполняется определенное условие, то реализуется одна из выходных ветвей узла, в противном случае выполняется работа альтернативной ветви
	Стохастическая ИМПЛИКАЦИЯ	Выполняется только одна выходящая из узла ветвь, если действие в узле завершено. Выбор такой ветви задаётся некоторой вероятностью

Обобщенная стохастическая альтернативная GERT-сеть процесса ремонта машины, прибора или оборудования изображена на Рис.1.

В дальнейшем будет применяться обобщенный термин «оборудование». На рисунке использованы условные обозначения узлов, принятые в GERT-сетях [11,12]. Результат выполнения работы на j -м этапе отображается на графе переходом из i -го в j -тое состояния, а время, затрачиваемое на выполнения работы на данном этапе t_{ij} , является параметром дуги. Петля t_{ii} означает, что процесс повторяется до тех пор,

пока не будет завершена работа данного этапа.

Каждая ветвь в этой модели характеризуется двумя параметрами: вероятностью выполнения и некоторой случайной величиной x , в качестве которой может время выполнения операции, стоимость выполнения и др.

Вес ветви (i,j) задается вектором $[p_{ij}, f(t_{ij})]$. Здесь p_{ij} – условная вероятность выполнения ветви (i,j) , при условии активации узла i (вероятность выполнения этапа ремонтных работ), а $f(t_{ij})$ – условная функция плотности вероятности продолжительности времени проведения этапа ремонтных работ t_{ij} , при условии выполнения работы (i,j) .

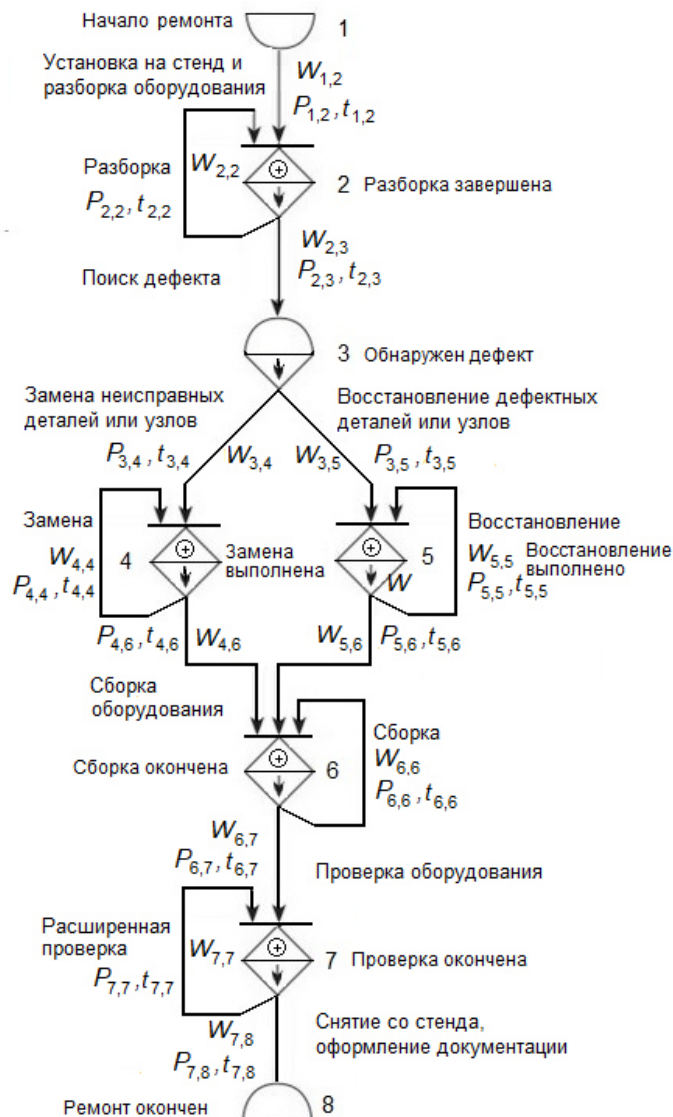


Рис.1 – Обобщенная стохастическая альтернативная GERT-сеть процесса ремонта оборудования

Первый узел отображает состояние начала выполнения ремонтных работ, а последний, 8-й – завершение ремонта.

В начале осуществляются действия по установке и закреплению оборудования на специализированном стенде и разборке его, на выполнение которых затрачивается время $t_{1,2}$.

Это время является случайной величиной, зависящей от многих факторов: состояния оборудования, условий и длительности эксплуатации (сорвана резьба на винтовых соединениях, необходимость высверливания шпилек и проч.).

В ряде случаев некоторые действия по разборке требуется выполнять повторно, на которые затрачивается время, обозначенное на модели $t_{2,2}$. Завершение процесса разборки отображается узлом 2. Стрелка на выходах узлов 2 – 7 обозначает логическую функцию «Если-то», при реализации которой переход на одну из ветвей осуществляется в зависимости от того, каков результат получен на данном этапе ремонтных работ. Так на выходе узла 2 с вероятностью $P_{2,2}$ будет продолжаться процесс разборки и с вероятностью $P_{2,3}$ начнет выполняться поиск неисправности, который завершится составлением ведомости дефектов.

В зависимости от вида неисправности будет выполняться работа по замене неисправных узлов, либо производиться восстановление дефектных деталей или узлов. После завершения одной из этих работ осуществляется сборка и проверка (тестирование) отремонтированного оборудования. Причем, в зависимости от результатов проверки может понадобиться проведение дополнительных измерений (петля в узле 7) для принятия остаточного заключения о соответствии отремонтированного оборудования техническим требованиям. На завершающем этапе производится отсоединение оборудования от ремонтного стенда и оформление сертификата о годности оборудования к эксплуатации.

Продолжительность всего процесса ремонта оборудования является случайной величиной. Поэтому для оценки прогнозируемого времени ремонта используется математическое ожидание, а оценки степени его рассеяния – дисперсия. Для определения математических выражений для их вычислений будем исходить из следующих соображений.

Переход из одного состояния в другое занимает случайное время, которое характеризуется комплексной характеристикой – производящей функцией моментов $M(s)$, которая представляет собой двустороннее преобразование Лапласа распределения случайной величины. Здесь переменная Лапласа $s = \sigma + i\omega$. По определению производящей функции моментов $M(s)$, $M(0) = 1$. При условии, что известна плотность распределения времени выполнения этапа ремонтных работ $f_{ij}(t)$, можно вычислить производящую функцию моментов случайного процесса t_{ij} [13].

$$M_{i,j}(s) = E[\exp\{st_{ij}\}] = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{st_{ij}\} f(t_{ij}) dt_{ij}. \quad (1)$$

Если вероятность того, что i,j -й этап процедуры ремонта будет выполнен при условии, что предыдущее состояние завершено, обозначить через p_{ij} , то можно задать передаточную W -функцию звена [11]:

$$W_{ij}(s) = p_{i,j} M_{i,j}(s). \quad (2)$$

С помощью преобразования (2) можно уменьшить количество параметров сети и соответственно упростить её анализ.

Получение эквивалентной передаточной функции всей сети $W_{eq}(s)$ от

входного узла к выходному, осуществляется в следующем порядке:

1) записать передаточные функции (ПФ) всех прямых путей (если их несколько) от входа к выходу в виде суммы произведений передаточных функций всех последовательных звеньев на каждом из путей;

2) выявить петли (замкнутые контуры) всех порядков и записать их передаточные функции;

3) составить на основе формулы Мейсона математическое выражение для эквивалентной передаточной функции сети $W_{eq}(s)$ [14]:

$$W_{eq}(s) = \frac{\sum_{k=1}^K W_k(s) \Delta_k(s)}{\Delta(s)}, \quad (3)$$

где $W_k(s)$ – передаточные функции k -го прямого канала, связывающего вход сети с ее выходом, являющиеся произведениями передаточных функций ветвей для всех k последовательных направленных ветвей графа, ведущих от входного узла к выходному; K – количество параллельных ветвей; $\Delta(s)$ – определитель графа, носящий название топологического уравнения для замкнутых графов; $\Delta_k(s)$ – определитель подграфа i -го прямого пути.

Определитель графа $\Delta(s)$ рассчитывается по формуле [14]:

$$\begin{aligned} \Delta(s) = & 1 - \sum_j^{n_1} W_{oj}(s) + \sum_{j,k}^{n_2} W_{oj}(s)W_{ok}(s) - \sum_{j,k,l}^{n_3} W_{oj}(s)W_{ok}(s)W_{ol}(s) + \\ & + \sum_{j,k,l,m}^{n_4} W_{oj}(s)W_{ok}(s)W_{ol}(s)W_{om}(s) + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

В последнем выражении:

– $\sum_j^{n_1} W_{oj}(s)$: сумма передаточных функций (ПФ) W_o всех возможных

петель (замкнутых контуров) сети первого порядка: ПФ замкнутого контура определяется как произведение передаточных функций всех дуг, входящих в контур с учётом знаков;

– $\sum_{j,k}^{n_2} W_{oj}(s)W_{ok}(s)$: сумма произведений ПФ всех комбинаций петель

второго порядка (пар петель, которые не пересекаются друг с другом, т.е., не имеют общих ветвей или узлов);

– $\sum_{j,k,l}^{n_3} W_{oj}(s)W_{ok}(s)W_{ol}(s)$: сумма произведений ПФ всех комбинаций

петель 3-го порядка, т.е. троек петель, которые не имеют общих ветвей или узлов;

– $\sum_{j,k,l,m}^{n_4} W_{oj}(s)W_{ok}(s)W_{ol}(s)W_{om}(s)$: сумма произведений ПФ всех комбинаций петель 4-го порядка, т.е. четвёрок петель, которые не имеют общих ветвей или узлов;

– W_{oj} : передаточная функция j -го простого контура, равная произведению передаточных функций входящих в это контур дуг;

– n_i : количество непересекающихся петель i -го порядка.

Определитель подграфа k -го прямого пути $\Delta_k(s)$ рассчитывается по формуле (4) с учётом того, что выражение для подграфа формируется при удалении дуг и вершин k -го прямого пути, а также всех дуг, выходящих и входящих в удаляемые вершины.

Результаты построения альтернативной сетевой модели с использованием обозначенного подхода.

Так как граф GERT-сети, изображенной на Рис.1 имеет два прямых пути, проходящими через параллельные узлы 4 и 5 с передаточными функциями, а подграфы путей отсутствуют, т.е. $\Delta_1(s) = \Delta_2(s) = 0$, то выражение для эквивалентной передаточной функции принимает вид:

$$W_{eq} = \frac{W_{12}W_{23}W_{67}W_{78}}{1 - (W_{22} + W_{44} + W_{55} + W_{66} + W_{77}) + W_{22}(W_{66} + W_{77})} \times \\ \times \frac{[W_{34}W_{45}(1 - W_{55}) + W_{35}W_{56}(1 - W_{44})]}{(1 - W_{22})(1 - W_{44})(1 - W_{55})(1 - W_{66})(1 - W_{77})}. \quad (5)$$

Для определения параметров распределения эквивалентной сети будем исходить из следующих соображений. Эквивалентная W -функция альтернативной стохастической сети на основании (2) может быть представлена в виде

$$W_{eq}(s) = p_{eq}M_{eq}(s), \quad (6)$$

где p_{eq} – вероятность завершения процесса ремонтных работ в целом.

Вычислим эквивалентную производящую функцию моментов в точке $s = 0$. Положив в (1) $s = 0$, получим:

$$M_{eq}(s) \Big|_{s=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{st\} f_{eq}(t) dt \Big|_{s=0} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{eq}(t) dt = 1. \quad (7)$$

Подстановка (5) в (4), определит значение эквивалентной вероятности завершения процесса ремонта в целом при $s = 0$:

$$p_{eq} = W_{eq}(0). \quad (8)$$

На основании (4) с учетом (6) получим выражение для производящей функции моментов эквивалентной сети:

$$M_{eq}(s) = \frac{M_{eq}(s)}{p_{eq}} = \frac{M_{eq}(s)}{M_{eq}(0)}. \quad (9)$$

Математическое ожидание времени завершения всего процесса ремонта оборудования может быть найдено путём вычисления первой производной эквивалентной производящей функции моментов всей сети при $s = 0$ [9,10].

$$\overline{t_{eq}^2} = \left. \frac{\partial M_{eq}(s)}{\partial s} \right|_{s=0}. \quad (10)$$

Дисперсия времени выполнения процедуры ремонта оборудования представляет собой разность между вторым начальным моментом и квадратом математического ожидания этого процесса. С учетом того, что второй начальный момент случайного процесса равен второй производной производящей функции моментов, выражение для дисперсии можно записать в виде:

$$\sigma_{eq}^2 = \left. \frac{\partial^2 M_{eq}(s)}{\partial s^2} \right|_{s=0} - \overline{t_{eq}^2}. \quad (11)$$

Для вычисления значений времени выполнения ремонтных работ конкретного оборудования следует иметь данные о вероятностях дуг на каждом этапе p_{ij} , законах и параметрах распределения длительностей отдельных этапов ремонтных работ, которые могут быть определены экспериментальным путем в процессе статистических исследований и выполнить расчет производящих функций моментов отдельных ветвей $M_{ij}(s)$. Затем по формуле (2) вычислить соответствующие передаточные функции $W_{ij}(s)$ и подставив эти значения в (5), получить выражение для эквивалентной передаточной функции модели процесса ремонта оборудования.

Формулы для производящих функций для наиболее распространенных законов распределения приведены в [11]. Так, например, при нормальном распределении длительности выполнения работ, производящая функция имеет вид:

$$M(s) = \exp\{sm + 0,5s^2\sigma^2\},$$

где m – математическое ожидание, а σ^2 – дисперсия длительности выполнения работ на данном этапе.

Если для составленной GERT-сети по ремонту некоторого гипотетического оборудования $P_{1,2} = 1$, среднее время, затрачиваемое на его установку и разборку равно $0,75 \pm 0,2$ часа, выражение для передаточной функции $W_{1,2}$ имеет следующее значение:

$$W_{12} = \exp\{0,75 + 0,04s^2\}.$$

Аналогичным образом вычисляются все передаточные функции, входящие в формулу (5), и определяется эквивалентная передаточная функция, на основе которой определяются производящая функция моментов эквивалентной сети M_{eq} , а далее математическое ожидание и дисперсия процесса ремонта в целом.

Выводы.

Применение альтернативных стохастических GERT-сетей является перспективным направлением в машино- и приборостроении, позволяющее наглядно представить в формализованном виде технологию ремонта и получить прогностические оценки длительности проведения ремонта различного оборудования с достаточно высокой точностью. Приведена обобщенная GERT-сеть для гипотетического технологического процесса ремонта оборудования и эквивалентная W -функция этой сети. При нахождении временных оценок длительности процесса ремонта конкретного оборудования, машины или прибора требуется составление GERT-сети технологии ремонта данного объекта и проведения статистических исследований вероятностных параметров по каждому из этапов ремонтных работ. Для некоторых видов распределения вероятностей длительности отдельных этапов работ, например, β -распределения, задачи расчета длительности ремонта существенно усложняются, которые могут быть решены на основе численного моделирования.

Библиографический список.

1. Стребков С.В. Технология ремонта машин / С.В. Стребков, А.В. Сахнов. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 246 с.
2. Кизим А.В. Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования / А.В. Кизим, Е.В. Чиков, В.Ю. Мельник // Открытое образование. – 2011. – №2. – С. 224-227.
3. Pritsker A.A.B. GERT: Graphical evaluation and review technique : Memorandum RM-4973-NASA / A.A.B. Pritsker. – Santa Monica, Calif. : RAND Corporation, 1966. – 138 p.
4. Pritsker A.A.B. GERT: Graphical Evaluation and Review Technique: Part II. Probabilistic and Industrial Engineering Applications / A.A.B. Pritsker, G.E. Whitehouse // Journal of Industrial Engineering. – 1966. – Vol. 17. – P. 229-239.
5. Ахьюджа Х. Сетевые методы управления в проектировании и производстве. Пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 639 с.
6. Ермолаева Л.В. GERT-сетевой анализ производственных процессов / Л.В. Ермолаева, С.И. Сенашов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2007. – Т.16. – №3. – С. 157-160.
7. Шибанов А.П. Использование стохастических сетей при планировании сборочных операций с функциями от случайных величин / А.П. Шибанов, А.З. Нгуен // Вестник РГРТУ. – 2019. – №69. – С. 86 – 92.
8. Aytulun S.K. Using GERT networks in business process modeling / S.K. Aytulun, M. Ermis // Journal of Aeronautics and Space Technologies. –

2010. – Vol. 4. – №3. – P. 19-31.
9. Чернега В.С. Влияние точности прогноза длительности урологической операции на качество жизни послеоперационных больных / В.С. Чернега, Н.П. Тлуховская-Степаненко // Качество и жизнь. – 2019. №1(21). – С. 94-98.
 10. Чернега В.С. Стохастическая сетевая модель трансуретральной лазерной литотрипсии / В.С. Чернега, Н.П. Тлуховская-Степаненко, А.Н. Еременко // Интеллектуальные информационные системы: труды Международной научно-практической конференции, Воронеж, 2-4 декабря 2020 г. Ч. 3 – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2021. – Ч.2. – С. 41-45.
 11. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М. : Мир, 1984. – 496 с.
 12. Корячко В.П. Основы теории GERT-сетей / В.П. Корячко, Н.В. Кравчук, А.П. Шибанов [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2010. – 207 с.
 13. Вентцель Е.С. Задачи и упражнения по теории вероятностей: Учеб. Пособие для студ. вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 5-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 448 с.
 14. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов / Д.П. Ким. – М. : Издательство Юрайт, 2025. – 309 с.

¹*Чернега Виктор Степанович, канд. техн. наук, доц., доцент, v_chernega@rambler.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Карлусов Вадим Юрьевич, канд. техн. наук, доц., доцент, kvyu_2015@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

³*Лушина Виктория Сергеевна, ассистент, vsyanovskaya@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Chernega Viktor Stepanovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, v_chernega@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Karlusov Vadim Yur'evich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, kvyu_2015@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Lushina Victoria Sergeevna, Assistant, vsyanovskaya@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛОВ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАУССА И РЭЛЕЯ В ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЯХ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.², Филипович О.В.³

APPLICATION OF FUNCTIONALS OF THE GAUSSIAN AND RAYLEIGH DISTRIBUTION LAWS IN PROBABILISTIC MODELS

Bokhonsky A.I.¹, Varminskaya N.I.², Filipovich O.V.³

Аннотация. Для законов распределения случайных величин Гаусса и Рэля с привлечением алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (названо реверсионным исчислением) восстановлены функционалы, в общем виде отражающие свойства случайных величин. Для этих функционалов с использованием теоремы о численном равенстве определенных интегралов из общего нелинейного алгебраического уравнения первообразных графически найдены корни, являющиеся верхним пределом интегрирования. Обсуждается возможность практического использования результатов, отражающих совместное применение теории вероятностей и вариационного исчисления.

Abstract. Functionals that generally reflect the properties of random variables are reconstructed for the distribution laws of Gaussian and Rayleigh random variables using the algorithm of the complete inverse problem of the calculus of variations (called reversal calculus). For these functionals, using the theorem on the numerical equality of definite integrals from a general nonlinear algebraic equation of antiderivatives, the roots, which are the upper limit of integration, are graphically found. The practical application of these results, reflecting the combined application of probability theory and the calculus of variations, is discussed.

Ключевые слова. Теория вероятностей, среднее квадратическое отклонение, законы Гаусса и Рэля, восстановленные функционалы, приложения.

Keywords. Probability theory, standard deviation, Gauss and Rayleigh laws, reconstructed functionals, applications.

Введение.

Методам теории вероятностей и математической статистики посвящены классические работы [1-6]. Законы распределения случайных величин в известной степени близки в отражении их свойств. Если функция плотности вероятности Гаусса определена на множестве $(-\infty, +\infty)$, то для функции Рэля – от 0 до $+\infty$. При этом математическое ожидание для закона Рэля $m = \sigma \sqrt{\pi/2}$, где σ – параметр масштаба распределения Рэля и среднее квадратичное отклонение $\sigma_x \approx \sigma \cdot 0,655$. Предполагается, что существуют области значений аргумента, для которых функции Гаусса и Рэля близки в отражении равновесного состояния системы.

При заданных аналитических функциях законов распределения

функционалы восстанавливаются согласно алгоритму решения полной обратной задачи вариационного исчисления. Задача данного типа посвящены, например, работы [7,8].

Пример использования такого алгоритма иллюстрируется для простого случая. Если задано дифференциальное уравнение $\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{2y}{x^2}$, которое может быть получено в результате преобразования функции $y = C_1 x^2 + \frac{C_2}{x}$, то восстановленный функционал имеет вид

$J = \int F(x, y, y') dx$, где $F(x, y, y') = \frac{y'^2}{2} + \frac{y^2}{x^2}$. Для этого функционала исходное уравнение является его первой вариацией и далее справедливо $\frac{F(x, y, y')}{dy} - \frac{d}{dx} \left(\frac{F(x, y, y')}{dy'} \right) = 0$.

Цель исследования – обоснование возможностей в первом приближении совместного использования восстановленных функционалов в моделях отражения природы закономерностей случайных явлений.

Функционал для нормального закона распределения.

Важной особенностью закона Гаусса является его свойство, благодаря которому при определенных условиях близки другие законы. Функция плотности вероятности нормального закона распределения случайной величины x имеет вид:

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

где m – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение.

Вычисляя производные $\frac{df_g(x)}{dx}$, $\frac{d^2 f_g(x)}{dx^2}$ и выполняя преобразования, приходим к однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 f_g(x)}{dx^2} + \frac{\sigma^2 - (m-x)^2}{\sigma} f_g(x) = 0, \quad (2)$$

которое предполагается первой вариацией (уравнением Эйлера) восстанавливаемого функционала вида

$$J_g = \int_{-\infty}^{\infty} F_g(f'_g(x), f_g(x), x) dx. \quad (3)$$

Функционалу (3) данного типа соответствует уравнение Эйлера

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_g}{\partial f'_g} \right) - \frac{\partial F_g}{\partial f_g} = 0. \quad (4)$$

С учетом (4) и (2) следует:

$$J_g = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{f'_g{}^2}{2} + \frac{\sigma^2 - (m-x)^2}{2\sigma^4} \cdot f_g^2 \right) dx. \quad (5)$$

Функционал (5) отражает экстремальное свойство случайных величин, подчиненных нормальному закону.

Функционал для закона распределения Рэлея.

Плотность вероятности представима функцией:

$$f_R(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где математическое ожидание $m = \sigma \sqrt{\pi/2}$, σ – параметр масштаба распределения Рэлея, среднее квадратичное отклонение $\sigma_x = \sigma \cdot 0,655$.

Преобразования по восстановлению функционала аналогичны предыдущим. Для функционала $J_R = \int_0^{\infty} F_R(f'_R(x), f_R(x), x) dx$ уравнение

Эйлера по аналогии с $F_y - \frac{d}{dx} F_{y'} = 0$ в результате вычисления производных и преобразований получим следующее однородное дифференциальное уравнение Эйлера

$$\frac{d^2 f_R(x)}{dx^2} + \frac{3\sigma^2 - x^2}{\sigma^4} f_R(x) = 0, \quad (7)$$

которое порождает функционал вида

$$J_R = \int_0^{\infty} \left(\frac{f'_R{}^2}{2} - \frac{3\sigma^2 - x^2}{2\sigma^4} \cdot f_R^2 \right) dx. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) для параметра σ не использованы дополнительные индексы.

Закон Рэлея находится в частной области закона Гаусса значений случайных величин, оставаясь при этом адекватным отражением действительности в этой ограниченной области значений. Поэтому сравнение функционалов будет осуществляться в общей области значений

x от 0 до $+\infty$.

Задача численного сравнения интегралов сводится к формированию уравнения первообразных при интегрировании от 0 до x_1 (x_1 – верхний предел интеграла). С использованием теоремы о численном равенстве определенных интегралов [9] получено уравнение:

$$\int_0^{x_1} F_g(f'_g(x), f_g(x), x) dx - \int_0^{x_1} F_R(f'_R(x), f_R(x), x) dx = 0. \quad (9)$$

$$T(x_1) = \frac{e^{-\frac{m^2}{\sigma^2}}}{4\pi\sigma^4} \left(-m + e^{\frac{x_1(2m-x_1)}{\sigma^2}} + x_1 \left(m - e^{\frac{x_1(2m-x_1)}{\sigma^2}} \right) \right) -$$

$$-\frac{x_1}{2\sigma_1^2} (\sigma_1^2 - x_1^2) e^{-\frac{x_1^2}{\sigma_1^2}} = 0. \quad (10)$$

На Рис.1 приведен один из примеров графического поиска решения нелинейного уравнения (10), отмечены два корня, при которых интегралы численно равны.

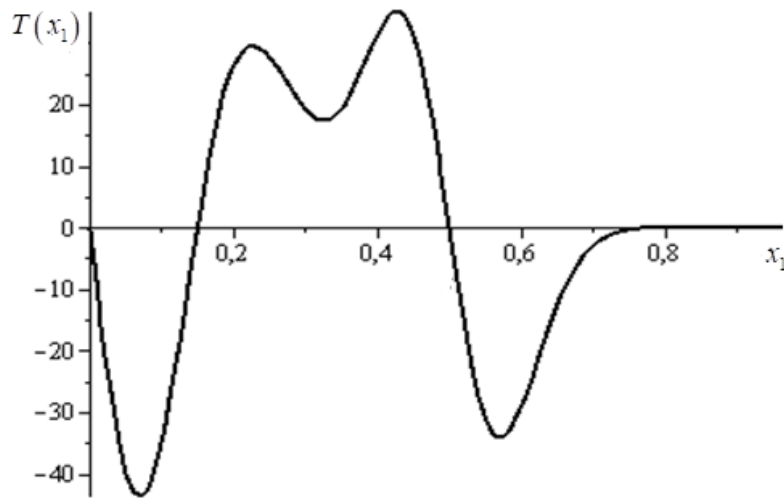


Рис.1 – График поиска корней уравнения первообразных

На Рис.2 изображены графики функций $f_g(x)$ и $f_R(x)$, которые отражают общую область для двух функций плотностей распределения случайных величин (для закона Гаусса $m=0,3$, $\sigma=0,1$ и в случае Рэля $m=0,3$, $\sigma_1=0,15$).

Заключение.

Рассмотренный алгоритм аналитических вычислений может найти приложение при использовании вероятностных моделей для описания состояния различных процессов и систем с неотрицательными случайными величинами.

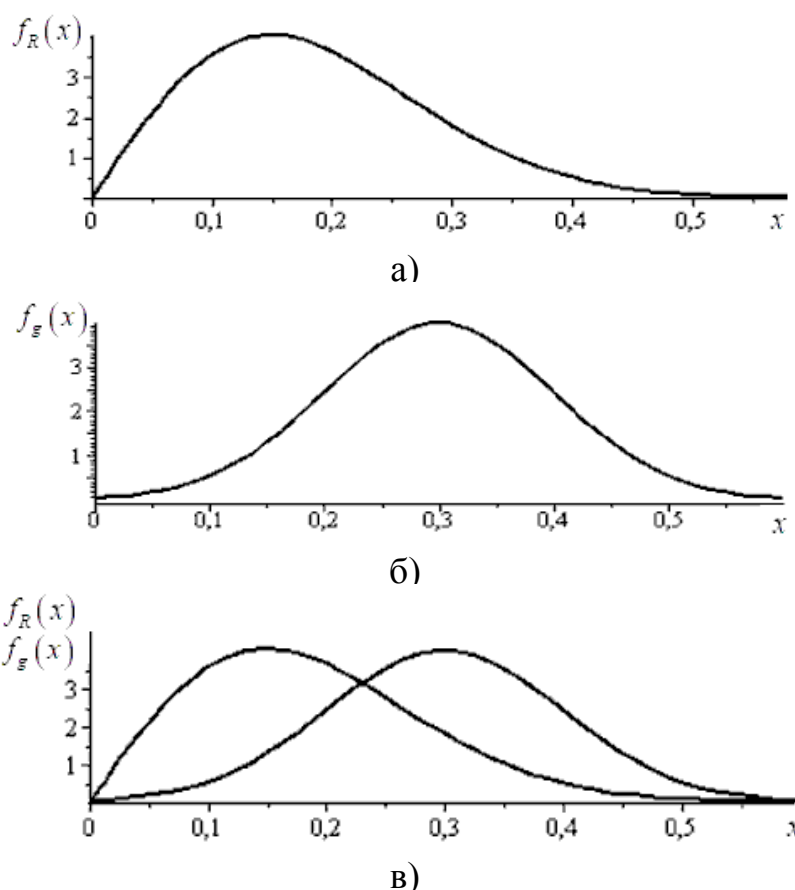


Рис.2 – Графики плотностей распределения случайных величин:
а) Рэля; б) Гаусса; в) совмещенные графики

При разработке математических моделей технологических процессов изготовления деталей и последующей сборки изделий в машиностроении и приборостроении применяются строго положительные статистические данные о геометрических и механических величинах, на основании которых восстанавливаются участвующие в математических моделях законы распределения [10,11]. Однако, в данном случае однопараметрического описания случайных величин применение, например, в моделях закона Рэля будет недостаточно. Поэтому привлечение закона распределение Райса [12], выполнение аналогичных аналитических преобразований и численных экспериментов является перспективой дальнейших исследований.

Библиографический список.

1. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая аналитика / В.С. Пугачев. – М. : Наука, 1979. – 196 с.
2. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей : учебник / Б.В. Гнеденко. – М : Наука, 1988. – 448 с.
3. Rohatgi V.K. An introduction to probability theory and mathematical statistics / V.K. Rohatgi. – NY : Wiley, 1976. – 684 p.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1973. – 368 с.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб.

- пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 10-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2004. – 479 с.
7. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности : монография / А.И. Бохонский. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
8. Бохонский А.И. Вариационное исчисление в механике : монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
9. Бохонский А.И. Равенство определенных интегралов с различными подынтегральными функциями / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская // Фундаментальные основы механики. – 2023. – № 11. – С. 18-22. – DOI 10.26160/2542-0127-2023-11-18-22.
10. Филипович О.В. Влияние погрешностей измерения на показатели однопараметрической многовариантной селективной сборки двух элементов /О.В. Филипович //Современные технологии сборки: Материалы VIII Международного научно-технического семинара, Москва, 19–20 октября 2023 года. – Москва: Московский Политех, 2023. – С. 149-154. – EDN VTMUTS.
11. Филипович О.В. Методы моделирования процессов однопараметрической многоэлементной селективной сборки /О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. – № 2(30). – С. 44-50. – EDN OISYXS.
12. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учебное пособие для ВУЗов / А.И. Перов. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.

¹*Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

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

³*Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., доцент, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

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

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

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПУТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Мирзоян Н.Ю.¹, Заморёнов М.В.², Заморёнов И.М.³, Малицкая А.А.⁴

APPLICATION OF THE PATH METHOD FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF AN ELECTRIC MOTOR

Mirzoyan N.Y.¹, Zamoryonov M.V.², Zamoryonov I.M.³, Malitskaya A.A.⁴

Аннотация. В данной статье строится аналитическая модель для оценки надежности промышленного электродвигателя. Модель учитывает диагностику износа подшипников и основывается на аппарате полумарковских процессов, а также на оригинальном методе путей, предложенном авторами. Ключевым выходным параметром моделирования выбрано время безотказной работы системы. Верификация модели осуществляется путем сравнения математического ожидания времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний с результатами, полученными при моделировании такой системы методом траекторий.

Abstract. This paper constructs an analytical model for assessing the reliability of an industrial electric motor. The model takes into account data from bearing wear diagnostics and is based on the apparatus of semi-Markov processes, as well as an original method of paths proposed by the authors. The system's time to failure is chosen as the key output parameter of the simulation. Verification of the model is carried out by comparing the mathematical expectation of the system's sojourn time in the subset of operable states with the results obtained by modeling such a system using the method of trajectories.

Ключевые слова. Полумарковская модель, электродвигатель, диагностика, безотказная работа, метод путей.

Keywords. Semi-Markov model, electric motor, diagnostics, trouble-free operation, trajectory method.

Введение.

В условиях активного роста промышленного сектора Российской Федерации особую актуальность приобретают вопросы повышения надежности автоматизированных производственных систем. Ключевым элементом таких систем выступают электродвигатели, чей уровень надежности во многом определяет общую стабильность работы оборудования [1-3]. Как показывает практика, уязвимым местом электродвигателя являются подвижные части, в первую очередь подшипники, обеспечивающие вращение ротора. В связи с этим в настоящей работе предлагается подход, ориентированный на диагностику износа подшипников: своевременная замена данной детали является менее трудо- и времязатратной процедурой по сравнению с капитальным ремонтом всего двигателя после возникновения аварийной ситуации [4]. Следует отметить, что хотя условия эксплуатации также оказывают

существенное влияние на ресурс двигателя, в рамках данного исследования этот фактор не рассматривается.

Целью исследования является определение времени безотказной работы электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников в математической модели функционирования двигателя с использованием метода путей.

Материалы и методы.

Для достижения поставленной цели будем использовать аппарат полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний [5-8].

Необходимо отметить, что моделирование такой системы проводилось в [9]. Причем, для моделирования применялся метод траекторий. В данной работе при моделировании будет использован метод путей.

Опишем функционирование такой системы. Время её безотказной работы – α_1 , время восстановления – β_1 . В случайный момент времени (через промежутки α_2 – время до диагностики подшипника) проводятся диагностики, время проведения которой – β_2 . Если диагностика выявила износ подшипника, то проводится его замена. Время износа подшипника – α_3 , время его замены – β_3 .

Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния [10-13]:

$$E = \{S_{000}, S_{0x10y}, S_{0x00y}, S_{0w0z1}, S_{100}, S_{002}\},$$

где S_{000} – система начала работу после восстановления; S_{0x10y} – начало диагностики, время до отказа системы – x , время до износа подшипника – y ; S_{0x00y} – система продолжила работу после диагностики, время до отказа системы – x , время до износа подшипника – y ; S_{100} – система отказала, идет восстановление; S_{0w0z1} – подшипник изнашивался, время до диагностики – w , время до отказа системы – z ; S_{002} – диагностирован износ подшипника, идет его замена.

Граф состояний системы приведен на Рис.1.

Разделим все множество состояний системы на подмножества работоспособных E_+ и неработоспособных E_- состояний:

$$E_+ = \{S_{000}, S_{0x10y}, S_{0x00y}, S_{0w0z1}\} \text{ и } E_- = \{S_{100}, S_{002}\}.$$

Причем

$$E = E_+ \cup E_-.$$

Необходимо определить функцию распределения времени пребывания системы в подмножестве E_+ .

Найдем функции распределения времен пребывания в состояниях:

$$\begin{aligned}
F_{000}(t) &= 1 - \bar{F}_1(t)\bar{F}_2(t), \quad F_{0x10y}(t) = G_2(t), \\
F_{0x00y}(t) &= 1 - \bar{F}_x(t)\bar{F}_y(t)\bar{F}_2(t), \\
F_{0w0z1}(t) &= 1 - \bar{F}_w(t)\bar{F}_z(t), \quad F_{002}(t) = G_3(t), \quad F_{110}(t) = G_1(t).
\end{aligned}$$

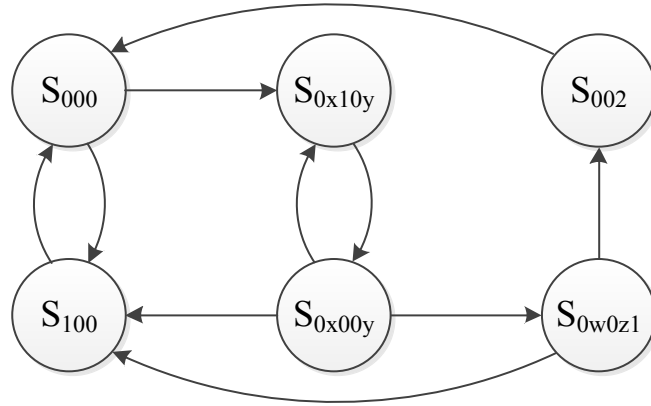


Рис.1 – Граф состояний системы

Укрупненные функции распределений непрерывных компонент $F_x(t)$, $F_y(t)$, $F_z(t)$, $F_w(t)$ находим с использованием метода укрупнения регенерирующих систем [14,15]:

$$\begin{aligned}
F_x(t) &= \frac{\int_0^\infty [F_1(t+x) - F_1(x)]h_2(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_1(x)]h_2(t)dt}; \quad F_y(t) = \frac{\int_0^\infty [F_3(t+x) - F_3(x)]h_2(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_3(x)]h_2(t)dt}; \\
F_w(t) &= \frac{\int_0^\infty [F_x(t+x) - F_x(x)]f_y(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_x(x)]f_y(t)dt}; \quad F_z(t) = \frac{\int_0^\infty [F_2(t+x) - F_2(x)]f_y(t)dt}{\int_0^\infty [1 - F_2(x)]f_y(t)dt};
\end{aligned}$$

где $h_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_2^{(*)k}(t)$, а * – знак операции свертки.

Опишем вероятности переходов.

$$\begin{aligned}
P_{100}^{000} &= P_{002}^{000} = P_{0x10y}^{0x00y} = 1; \quad P_{0x00y}^{0w0z1} = \int_0^\infty f_y(t)\bar{F}_x(x)\bar{F}_2(x)dt; \\
P_{000}^{100} &= \int_0^\infty f_1(x)\bar{F}_2(t)dt; \quad P_{000}^{0x10y} = \int_0^\infty f_2(t)\bar{F}_1(x)dt;
\end{aligned}$$

$$P_{0x00y}^{100} = \int_0^{\infty} f_x(t) \bar{F}_y(x) \bar{F}_2(x) dt; \quad P_{0x00y}^{0x10y} = \int_0^{\infty} f_2(t) \bar{F}_x(x) \bar{F}_y(x) dt;$$

$$P_{0w0z1}^{100} = \int_0^{\infty} f_w(t) \bar{F}_z(x) dt; \quad P_{0w0z1}^{002} = \int_0^{\infty} f_z(t) \bar{F}_w(x) dt.$$

Для получения искомых характеристик необходимо воспользоваться стационарным распределением вложенной цепи Маркова, для чего требуется составить и решить систему уравнений.

$$\begin{cases} \rho_{000} = \rho_{100} + \rho_{002} \\ \rho_{0x10y} = \rho_{000} P_{000}^{0x10y} + \rho_{0x00y} \\ \rho_{0x00y} = \rho_{0x10y} \\ \rho_{100} = \rho_{0x00y} P_{0x00y}^{100} + \rho_{0w0z1} P_{0w0z1}^{100} + \rho_{000} P_{000}^{100} \\ \rho_{0w0z1} = \rho_{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} \\ \rho_{002} = \rho_{0w0z1} P_{0w0z1}^{002} \end{cases}$$

Для корректного нахождения решения используется уравнение нормировки:

$$\rho_{000} + \rho_{0x10y} + \rho_{0x00y} + \rho_{100} + \rho_{0w0z1} + \rho_{002} = 1.$$

В ходе решения получаем:

$$\rho_{000} = \frac{1}{2 + \frac{P_{000}^{0x10y}}{1 - P_{0x00y}^{0x10y}} \cdot (2 + P_{0x00y}^{0w0z1})}.$$

Для нахождения искомой функции распределения воспользуемся методом путей [16,17].

Используя метод путей, определим все пути перехода системы из подмножества E_+ в подмножество E_- , вероятности их реализации и времена пребывания системы на этих путях. Пути:

$$W_1^1 : S_{000} S_{100}; \quad W_2^1 : S_{000} S_{0x10y} S_{0x00y} S_{100}; \quad W_2^2 : S_{000} (S_{0x10y} S_{0x00y})^2 S_{100};$$

$$W_2^n : S_{000} (S_{0x10y} S_{0x00y})^n S_{100}; \quad W_3^1 : S_{000} S_{0x10y} S_{0x00y} S_{0w0z1} S_{002};$$

$$W_3^2 : S_{000} (S_{0x10y} S_{0x00y})^2 S_{0w0z1} S_{002};$$

$$W_3^n : S_{000} (S_{0x10y} S_{0x00y})^n S_{0w0z1} S_{002};$$

$$W_4^1 : S_{000}S_{0x10y}S_{0x00y}S_{0w0z1}S_{100}; \quad W_4^2 : S_{000}(S_{0x10y}S_{0x00y})^2 S_{0w0z1}S_{100};$$

$$W_4^n : S_{000}(S_{0x10y}S_{0x00y})^n S_{0w0z1}S_{100}.$$

Вероятности реализации путей:

$$P_1^1 = P_{000}^{100}; \quad P_2^1 = P_{000}^{0x10y} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{100};$$

$$P_2^2 = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right) P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{100};$$

$$P_2^n = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right)^{n-1} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{100};$$

$$P_3^1 = P_{000}^{0x10y} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{002};$$

$$P_3^2 = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right) P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{002};$$

$$P_3^n = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right)^{n-1} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{002};$$

$$P_4^1 = P_{000}^{0x10y} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{100};$$

$$P_4^2 = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right) P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{100};$$

$$P_4^n = P_{000}^{0x10y} \left(P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0x10y} \right)^{n-1} P_{0x10y}^{0x00y} P_{0x00y}^{0w0z1} P_{0w0z1}^{100}.$$

Определим плотности распределения времен пребывания системы на путях:

$$f_1^1(t) = f_{000}(t); \quad f_2^1(t) = f_{000}(t) * f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t);$$

$$f_2^2(t) = f_{000}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*2};$$

$$f_2^n(t) = f_{000}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*n};$$

$$f_3^1(t) = f_{00}(t) * f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) * f_{0w0z1}(t);$$

$$f_3^2(t) = f_{00}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*2} * f_{0w0z1}(t);$$

$$f_3^n(t) = f_{00}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*n} * f_{0w0z1}(t);$$

$$f_4^1(t) = f_{00}(t) * f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) * f_{0w0z1}(t);$$

$$f_4^2(t) = f_{00}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*2} * f_{0w0z1}(t);$$

$$f_4^n(t) = f_{00}(t) * \left(f_{0x10y}(t) * f_{0x00y}(t) \right)^{*n} * f_{0w0z1}(t);$$

где * – знак операции свертки.

Плотность распределения времени пребывания системы в подмножестве E_+ [15] определяется как взвешенная сумма плотностей распределения времен пребывания системы на путях, причем коэффициентами взвеси служат вероятности реализации этих путей:

$$f_+(t) = \sum_i \sum_j P_j^i \cdot f_j^i(t).$$

Рассмотрим пример моделирования такой системы с известными параметрами распределения случайных величин.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$ и $G_3(t)$, которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \gamma_1, \gamma_2, \eta_1, \eta_2, \omega_1, \omega_2$ соответственно с учетом зависимостей:

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, & f_2(t) &= \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1}, \\ f_3(t) &= \frac{\eta_1 \eta_2 (e^{-\eta_1 t} - e^{-\eta_2 t})}{\eta_2 - \eta_1}, & g_1(t) &= \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \\ g_2(t) &= \frac{\gamma_1 \gamma_2 (e^{-\gamma_1 t} - e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2 - \gamma_1}, & g_3(t) &= \frac{\omega_1 \omega_2 (e^{-\omega_1 t} - e^{-\omega_2 t})}{\omega_2 - \omega_1}, \end{aligned}$$

где $\lambda_1 = 0,0133 \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,04 \text{ ч}^{-1}$; $\mu_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_1 = 0,00667 \text{ ч}^{-1}$, $\eta_2 = 0,02 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}$; $\gamma_1 = 1,33 \text{ ч}^{-1}$, $\gamma_2 = 4,0 \text{ ч}^{-1}$, $\omega_1 = 0,667 \text{ ч}^{-1}$, $\omega_2 = 2,0 \text{ ч}^{-1}$.

Сравним значения математического ожидания полученной функции и математического ожидания, определяемого в [9]. Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет 81,38831 ч, в то же время, математическое ожидание, полученное в работе [9], составило 81,38831 ч.

Очевидно, что математические ожидания совпадают.

Выводы.

Проведенное сравнение математических ожиданий времен пребывания в подмножестве работоспособных состояний, полученного на основании найденной в работе функции распределения и найденного в [9], показало правильность построения модели с привлечением метода путей и полученных результатов.

В дальнейших исследованиях планируется построение более сложных моделей анализа надежности электродвигателей, а также имитационных моделей анализируемых систем.

Библиографический список.

1. Каштанов В.А. Теория надёжность сложных систем : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.А. Клитанев, А.И. Медведев. – Изд. 2-е, перераб. – М. : Физматлит, 2010 – 608 с. : ил. – ISBN 978-5-9221-1132-4.
2. Поляков А.Е. Электрические машины, электропривод и системы / А.Е. Поляков, А.В. Чесноков, Е.М. Филимонова. – М. : Форум, 2016 – 240 с.
3. Архипцев Ю.Ф. Асинхронные электродвигатели / Ю.Ф. Архипцев. – М. : Книга по требованию, 2013. – 108 с.
4. Мандарыкин С.А. Ремонт асинхронных электродвигателей / С.А. Мандарыкин. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 85 с.
5. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем : монография / В.Я.Копп – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 700 с.
6. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных линий / Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2006. – 240с.
7. Копп В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2000. – 284 с.
8. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надёжности систем / Королюк В.С., Турбин А.Ф. – Киев : Наукова думка, 1982. – 236 с.
9. Мирзоян Н.Ю. Стохастическая модель оценки надёжности электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников / Н.Ю.Мирзоян, М.В. Заморёнов, И.М. Заморёнов // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2024. – Т. 27. – № 3. – С. 36-44.
10. Королюк В.С. Стохастические модели систем / В.С. Королюк. – Киев : Наукова думка, 1989. – 208 с.
11. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королюк // Кибернетика. – 1981. – № 4. – С. 121-124.
12. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – Киев : Наук. Думка, 1976. – 181 с.
13. Райншке К. Оценка надёжности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков. – М. : Радио и связь, 1988. – 208 с.
14. Заморёнов М.В. Метод моделирования регенерирующих систем / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30. – № 6. – С. 134-144.
15. Копп В.Я. Фазовое укрупнение полумарковских систем без определения стационарного распределения вложенной цепи Маркова / В.Я. Копп, М.В. Заморёнов, Н.И. Чаленков [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19. – № 3. – С. 539-563.
16. Заморёнов М.В. Моделирование процесса функционирования обслуживающего устройства с необесценивающими отказами методом путей / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, Д.В. Заморёнова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 7-1. – С. 71-82.

17. Заморёнов М.В. Использование метода путей при моделировании процесса функционирования технической системы с отключением рабочего элемента на период проведения контроля / М.В. Заморёнов, В.Я. Копп, С.Н. Федоренко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 63-69.

¹*Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nataly2997@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

³*Заморёнов Илья Михайлович, ассистент, imzamoryonov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

⁴*Малицкая Александра Александровна, старший преподаватель, malitskaya@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Mirzoyan Natalia Yurievna, Assistant, nataly2997@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Zamoryonov Ilya Mikhailovich, Assistant, imzamoryonov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Malitskaya Alexandra Alexandrovna, Senior Lecturer, malitskaya@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫХ АВТОМАТОВ С ПОВТОРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Балакина Н.А.¹

PERFORMANCE ANALYSIS OF CONTROL AND SORTING AUTOMATIC MACHINES WITH REPEATED MEASUREMENTS

Balakina N.A.¹

Аннотация. Использование многократных измерений является эффективным методом повышения точности за счет компенсации случайных погрешностей. Показано, что применение повторных измерений 100% контролируемых деталей снижает производительность контрольно-сортировочного автоматов с последовательным циклом выполнения операций на 34...43% при постоянном времени вспомогательных операций. Для автоматов с параллельным циклом предложена схема с двумя последовательно расположенными измерительными позициями для повторных измерений и блоком самоподнастройки для компенсации систематических составляющих погрешности измерения без снижения производительности автоматов.

Abstract. The use of repeated measurements is an effective method of accuracy increase due to compensation of random errors. It is shown that the use of repeated measurements of 100% of controlled parts reduces the productivity of the control and sorting automatic machine with a sequential cycle of operations by 34...43% at constant time of auxiliary operations. The scheme with two sequentially arranged measuring positions for repeated measurements and self-tuning block for compensation of systematic components of measurement error without reducing the productivity of automatic machines is proposed for automatic machines with parallel cycle.

Ключевые слова. Производительность, автомат, цикл, сортировка, повторные измерения, поднастройка, погрешность.

Keywords. Productivity, automatic, cycle, sorting, repeat measurements, tweaking, uncertainty.

Введение.

Развитие современного производства и его автоматизация, включая управление сложными техническими объектами, возможны только при условии совершенствования измерительной техники, повышения ее точности и надежности [1,10,11]. Совершенствование приемов и методов измерения, направленное на улучшение метрологических характеристик средств измерения, органично связано с развитием компьютерной техники, программного обеспечения, автоматизированных методов принятия решений и содержит в себе большие резервы повышения точности измерений, а значит, и качества производимой продукции [1,4,5].

Одним из методов повышения точности измерения является метод, основанный на использовании многократных измерений, который эффективен при доминировании случайных составляющих погрешности измерения [6-8]. Недостаток многократных измерений заключается в снижении производительности автоматизированных средств контроля.

Целью работы является количественная оценка изменения производительности контрольно-сортировочных автоматов (КСА) при использовании повторных измерений деталей.

Автоматические средства контроля и сортировки деталей в зависимости от конструкции могут реализовывать следующие виды построения циклов измерения T_u : параллельный, последовательный и смешанный [2,9,13,14]. Структурные схемы контрольно-сортировочных автоматов представлены на Рис.1.

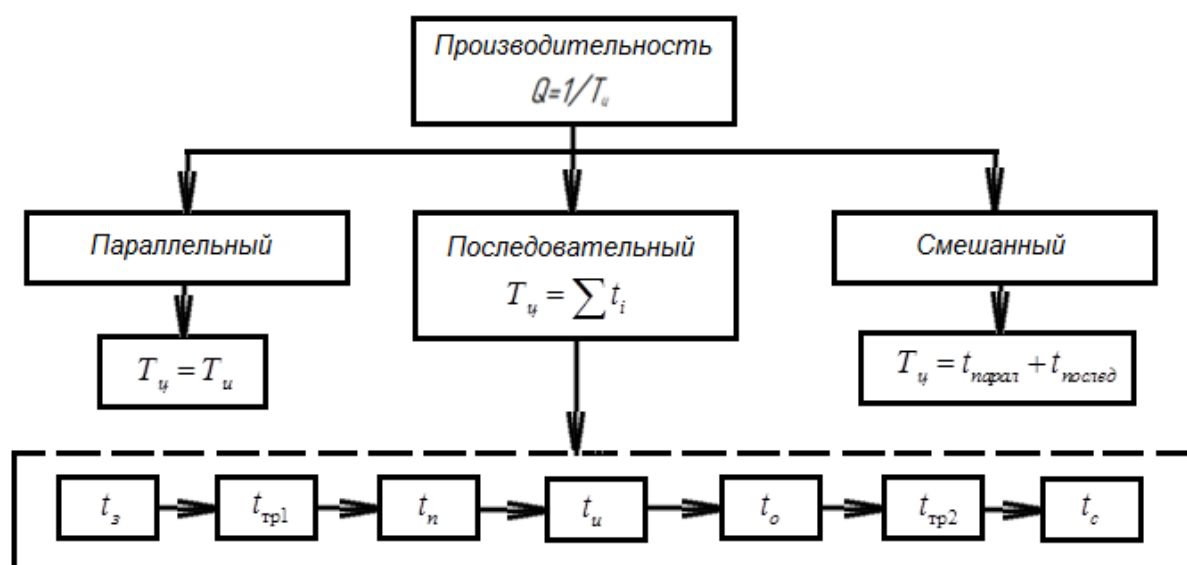


Рис.1 – Структурные схемы контрольно-сортировочных автоматов

Последовательный цикл.

Операции загрузки деталей t_3 ; транспортирования их к измерительной позиции, а затем к сортировочному устройству $t_{тр}$; измерения $t_{изм}$ и сортировки $t_{сорт}$ выполняют последовательно.

В зависимости от размеров, формы контролируемых деталей и вида контролируемых параметров цикл T_u КСА может включать операции базирования и зажима деталей $t_{бз}$, а также подвода-отвода измерительного устройства $t_{n(o)}$. Таким образом, время цикла T_u равно:

$$T_u = t_3 + 2t_{тр} + t_{бз} + 2t_{n(o)} + t_{изм} + t_{сорт}. \quad (1)$$

Время измерительной операции $t_{изм}$ складывается из следующих составляющих:

– время срабатывания $t_{сип}$ измерительного преобразователя и отсчетно-командного устройства;

- время арретирования t_{ap} измерительного преобразователя;
- время собственно измерения t_u ;
- время успокоения передаточного механизма $t_{yПМ}$ (пружинного параллелограмма или измерительного двуплечего рычага).

При измерении размера в одном случайном сечении время измерения определяется из выражения:

$$t_{изм} = t_u + t_{сИП} + t_{ap} + t_{yПМ} . \quad (2)$$

При измерении детали в процессе вращения $t_u = t_{u(вр)}$

$$t_{изм} = t_{u(вр)} + t_{сИП} + t_{ap} + t_{yПМ} , \quad (3)$$

где $t_{u(вр)} = 60 / n_{\partial}$ – время собственно измерения за один оборот детали, с;
 n_{∂} – скорость вращения детали, об/мин.

На Рис.2 показана схема автоматизированного контрольно-сортировочного устройства, реализующего последовательный цикл без вращения контролируемой детали.

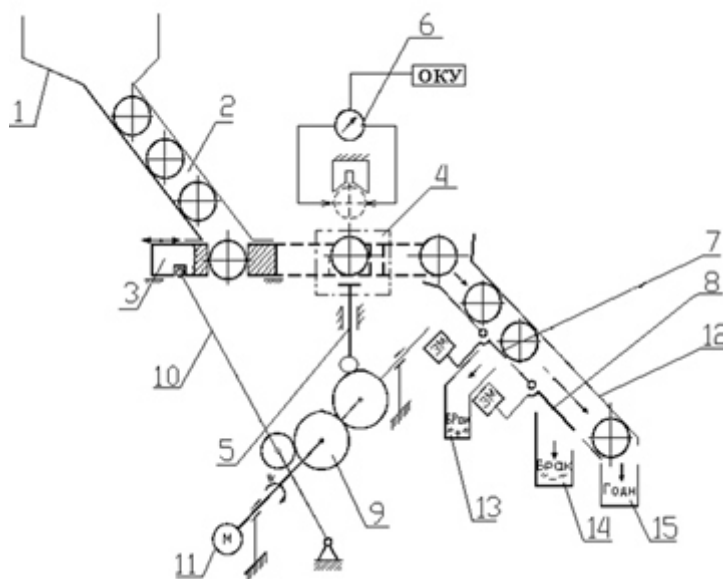


Рис.2 – Схема контрольно-сортировочного автомата с последовательным циклом построения

Принцип действия КСА следующий. Контролируемые детали из бункерно-загрузочного устройства 1 поступают в накопительный лоток 2, откуда шибером 3 подаются на измерительную позицию 4. Шток 5 поднимает контролируемую деталь к измерительному устройству 6, состоящему из скобы и преобразователя. По результату измерения диаметра детали отсчетно-командным устройством (ОКУ) определяется номер группы сортировки и подаётся команда на один из электромагнитов (ЭМ) исполнительного механизма сортировочного устройства, который поворачивает соответствующую заслонку 7 или 8. Приводом шибера 3 и штока 5 служит кулачковый вал 9 и рычаг 10. Вращение кулачкового вала

осуществляется от электродвигателя 11. После измерения шток 5 опускает деталь вниз, а шибер 3 перемещает её к наклонному сортировочному лотку 12, из которого деталь попадает в один из сортировочных бункеров: 13 – брак «+», 14 – брак «-», 15 – «годные». Если, например, открыта заслонка 7, то деталь поступает в сортировочный бункер 13.

КСА, реализующие последовательный цикл и измерение деталей в процессе их вращения обладают невысокой производительностью, поэтому при их проектировании стремятся к сокращению времени вспомогательных операций загрузки t_z , транспортирования t_{mp} , сортировки $t_{cопт}$, подвода-отвода измерительных устройств $t_{n(o)}$. При этом скорость перемещения детали принимается равной $V_d = 0,2$ м/с. Если принять величину перемещения деталей при транспортировании $\ell_{mp} = 100$ мм, загрузке $\ell_z = 50$ мм, подводе-отводе измерительного устройства $\ell_{n(o)} = 50$ мм, базировании и зажиме детали $\ell_{бз} = 10$ мм, то время вспомогательных операций равно:

$$t_{всн} = t_z + 2t_{mp} + t_{n(o)} + t_{бз} + t_{cопт}. \quad (4)$$

После подстановки в (4) значений ℓ_i и V_d получим:

$$t_{всн} = (\ell_z + 2\ell_{mp} + 2\ell_{n(o)} + \ell_{бз} + \ell_{cопт}) / V_d. \quad (5)$$

С учетом числовых данных:

$$t_{всн} = (0,025 + 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,05 + 0,01 + 0,025) / 0,2 = 1,8 \text{ с.}$$

Время цикла

$$T_{ц} = t_{всн} + t_{изм}, \quad (6)$$

где $t_{изм}$ – время измерительной операции согласно формуле (3).

Принимаем $n_d = 30$ об/мин, $t_{сИП} = 0,05$ с, $t_{ар} = 0,1$ с, $t_{уПМ} = 0,1$ с. Тогда $t_{u(вp)} = 60 / 30 = 2$ с.

С учетом принятых данных время измерительной операции составит:

$$t_{изм} = 2 + 0,05 + 0,1 + 0,1 = 2,25 \text{ с.}$$

Таким образом, время цикла (5) равно:

$$T_{ц} = 1,8 + 2,25 = 4,05 \text{ с.}$$

Отсюда видно, что время измерительной операции $t_{изм}$ составляет примерно 55,5% от времени цикла $T_{ц}$, а производительность $Q_{расч} = 1 / T_{ц} = 1 / 4,05 = 0,24$ шт/с или $Q_{расч} \approx 890$ шт/час.

Расчетное значение $Q_{расч}$ соответствует значениям производительности КСА колец подшипников при измерении их в

процессе вращения [3,12], что подтверждает правильность принятых исходных данных:

– КСА фирмы Цензор мод. JRS для контроля диаметра и формы поперечного сечения колец подшипников диаметром 5...25 мм, производительность 800 шт/час;

– КСА мод. СК-38 для измерения радиального биения внутренних диаметров колец диаметром 17...55 мм, наружных колец – диаметром 40...160 мм, производительность 600 шт/час;

– КСА мод. Р120К для измерения радиального биения деталей $d_{\max} = 20$ мм, $D_{\max} = 160$ мм, производительность 1000 шт/час;

– КСА мод. СК-9М, СК-9 для контроля габаритных размеров и биения подшипников, производительность 600 шт/час;

– КСА мод. СК-23М для контроля посадочных поверхностей и биения деталей $d_{\max} = 17...35$ мм, $D_{\max} = 40...80$ мм, производительность 514 шт/час.

Снижение производительности КСА при использовании повторных измерений с целью повышения точности сортировки деталей зависит от времени измерения $t_{изм}$ и числа деталей с повторными измерениями n_n . При $t_{изм} = 2,25$ с (одно измерение детали) производительность $Q = 890$ шт/час, при $t_{изм} = 4,5$ с (повторное измерение 100% деталей) время цикла составит $T_{ц} = 6,3$ с, а производительность КСА $Q = 571$ шт/час. Таким образом, снижение производительности составляет $\Delta Q = 36\%$ при 100% контроле деталей с повторными измерениями. Если количество повторно измеряемых деталей составит 10%, то снижение производительности составит $\Delta Q = 3,2\%$. Метод повторных измерений является частным случаем метода многократных измерений.

Время вспомогательных операций $t_{всп}$, время измерительной операции $t_{изм}$ и производительность Q связаны между собой следующей зависимостью:

$$Q = \frac{3600}{t_{всп} + t_{изм}}. \quad (7)$$

При сохранении времени вспомогательных операций $t_{всп} = 1,8$ с время измерительной операции $t_{изм}$ и время цикла $T_{ц}$ для значений производительности $Q_i = 500; 700; 1000$ шт/час определяются по формуле:

$$T_{ц} = \frac{3600}{Q}, \quad (8)$$

откуда

$$t_{изм} = \frac{3600}{Q} - t_{всп} = \frac{3600}{Q} - 1,8. \quad (9)$$

Время измерительной операции $t_{изм}$ зависит от времени собственно измерения t_u и скорости вращения детали в процессе измерения n_d (2), (3).

В таблице 1 приведены расчетные значения времени измерения $t_{изм}$ и времени цикла T_u (при сохранении времени вспомогательных операций $t_{всп} = 1,8$ с), производительности $Q_{ПИ}$ при повторных измерениях 100% деталей и снижения производительности $\Delta Q = Q - Q_{ПИ}$ при повторных измерениях $n_n = 10\%$; 50%; 100% деталей для исходной производительности автоматов $Q = 500$; 890; 1000 шт/час. При этом предполагается, что сокращение времени измерения $t_{изм}$ при $Q = 1000$ шт/час происходит за счет увеличения скорости вращения детали на позиции контроля и улучшения динамических характеристик преобразователя.

Таблица 1 – Расчетные данные времени цикла T_u , $Q_{ПИ}$, $\Delta Q = f(n_n)$ при $t_{всп} = const$

Производительность Q_i , шт/час	Время измерения $t_{изм}$, с	Время цикла T_u , с	Погрешность $Q_{ПИ}$, шт/час	ΔQ , % при n_n , %		
				10	50	100
500	5,4	7,2	286	4,3	21,5	43
700	3,34	5,14	425	3,9	19,5	39
890	2,25	4,05	571	3,6	18	36
1000	1,8	3,6	666,7	3,4	17	34

На Рис.3 показаны зависимости $\Delta Q = f(n_n)$ при различных значениях производительности КСА.

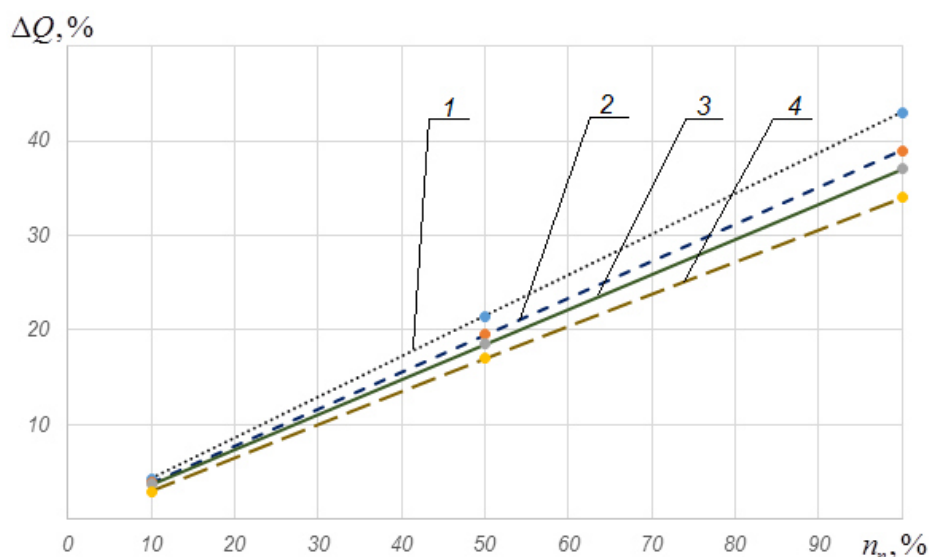


Рис.3 – Зависимость $\Delta Q = f(n_n)$ при $t_{всп} = const = 1,8$ с:

- 1 – $Q = 500$ шт/час; 2 – $Q = 700$ шт/час;
3 – $Q = 890$ шт/час; 4 – $Q = 1000$ шт/час

Из данных таблицы 1 и графиков (Рис.3) следует, что с увеличением исходной производительности КСА от 500 до 1000 шт/час процент снижения производительности ΔQ сокращается с 43 до 34% при $n_n = 100\%$, снижение производительности ΔQ при 10% деталей с повторными измерениями составляет 4,3...3,4% ($t_{всн} = \text{const} = 1,8$ с).

В таблице 2 приведены расчетные данные производительности автоматов $Q_{ПИ}$ при повторных измерениях 10%; 50%; 100% деталей и снижения производительности ΔQ при постоянном значении времени измерения $t_{изм}$.

Таблица 2 – Расчетные данные времени цикла $T_{ц}$, $Q_{ПИ}$, $\Delta Q = f(Q)$ при $t_{изм} = \text{const}$

Производи- тельность Q_i , шт/час	Время измерения $t_{изм}$, с	Время цикла $T_{ц}$, с	Производи- тельность $Q_{ПИ}$, шт/час	ΔQ , % при n_n , %		
				10	50	100
500	2,25	7,2	381	2,3	12,5	23
700	2,25	5,14	487	3,0	15,0	30
890	2,25	4,05	571	3,6	18,0	36
1000	2,25	3,6	615	3,85	19,25	38,5

Анализ данных таблицы 2 показывает, что при постоянном значении времени измерения $t_{изм} = \text{const}$ с увеличением исходной производительности автомата Q от 500 до 1000 шт/час процент снижения производительности ΔQ при 100% повторных измерений $Q_{ПИ}$ увеличивается с 23 до 38,5%, в отличие от результатов расчетов при $t_{всн} = \text{const}$ (таблица 1).

На Рис.4 показаны зависимости $\Delta Q = f(Q)$ при $t_{всн} = \text{const}$ и $t_{изм} = \text{const}$ для различных значений производительности КСА Q_i .

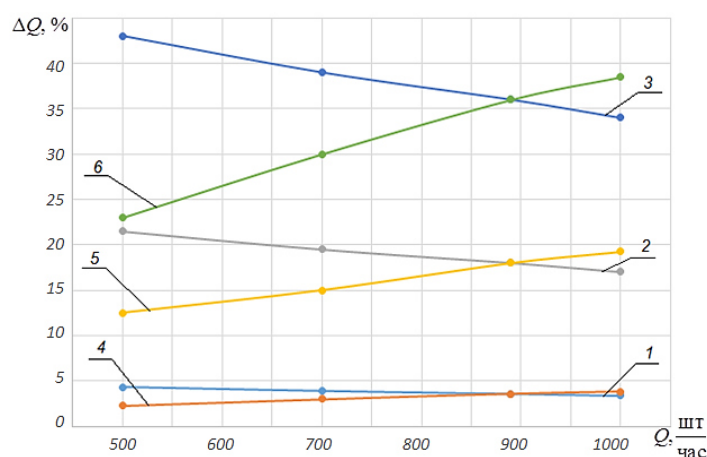


Рис.4 – Зависимости $\Delta Q = f(Q)$:

при $t_{всн} = \text{const} = 1,8$ с (1 – $n_n = 10\%$; 2 – $n_n = 50\%$; 3 – $n_n = 100\%$);
при $t_{изм} = \text{const} = 2,25$ с (4 – $n_n = 10\%$; 5 – $n_n = 50\%$; 6 – $n_n = 100\%$)

Параллельный цикл.

Операции загрузки, транспортирования, измерения и сортировки выполняются одновременно. Следовательно, время цикла определяется длительностью измерительной операции:

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{изм}}. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим схему КСА мод. 37АК (Рис.5) [12,13].

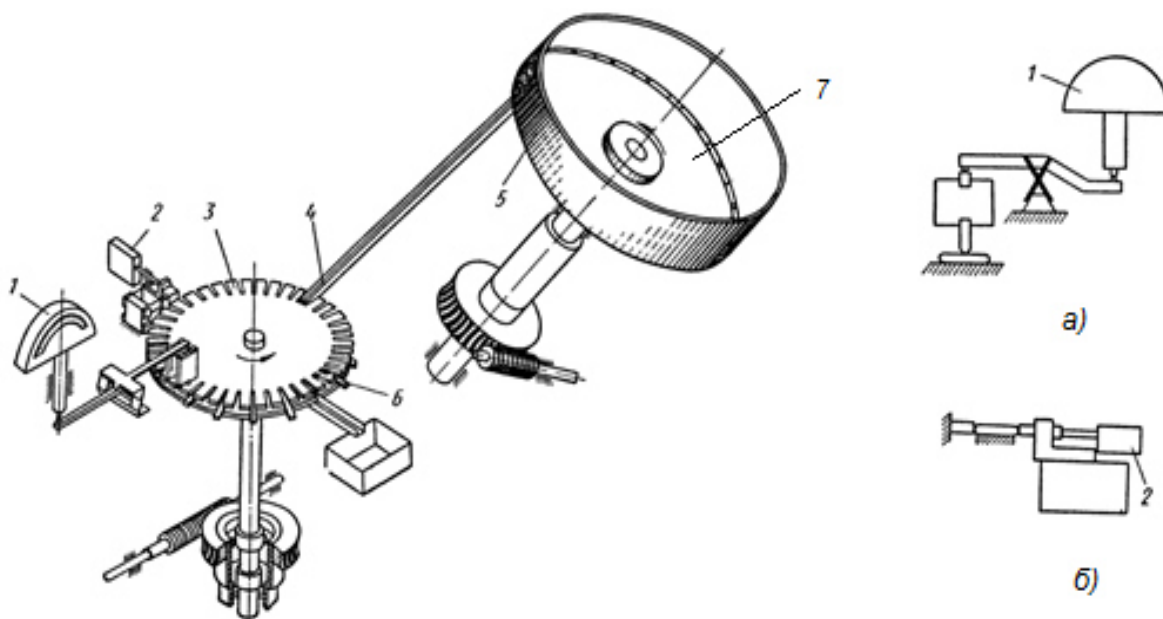


Рис.5 – Схема КСА мод. 37АК:

а – схема позиции измерения диаметра ролика; *б* – схема позиции измерения длины ролика

Автомат 37АК предназначен для сортировки игольчатых роликов диаметром 1,6...3 мм и длиной 8...30 мм на три группы по длине (брак «+», брак «-» и годная) и на 12 групп по диаметру (брак «+», брак «-» и десять годных). Сортировка роликов по длине и диаметру осуществляется на двух отдельных измерительных позициях.

Принцип работы автомата следующий. Засыпанные в бункер 5 ролики с помощью непрерывно вращающегося диска 7 подаются в приёмный лоток 4. При совпадении паза транспортирующего диска 3 с окном лотка 4 очередной ролик западает в него и перемещается на позицию измерения длины. Измерение длины производится с помощью двухпредельного электроконтактного датчика 2 (мод. 233). При обнаружении брака открывается заслонка сортировочного устройства, ролик проваливается в один из отсеков брака по длине. Годные ролики транспортируются далее на позицию измерения диаметра.

Измерение роликов по диаметру производится с помощью фотоэлектрического многодиапазонного датчика 1 (мод. 1ДФМ). Засвеченный фоторезистор датчика фиксирует номер сортировочной

группы ролика и подает команду на соответствующий электромагнит сортировочного устройства 6.

В КСА с параллельным циклом выполнения операций повторные измерения параметра могут быть реализованы без сокращения производительности Q автомата путем применения в кинематической схеме второй измерительной позиции. Параллельный цикл используется в высокопроизводительных КСА для сортировки деталей массового производства – шариков и различных видов роликов (цилиндрических, конических, игольчатых) подшипников. Схемы автоматов такого типа предусматривают непрерывное движение контролируемых деталей по лотку или на вращающемся транспортирующем диске и измерение их диаметра при прохождении под измерительным наконечником преобразователя.

На Рис.6 показана блок-схема КСА для контроля диаметров и сортировки роликов подшипников на размерные группы. При контроле простых по формы, небольших по размерам деталей без их вращения в процессе измерения не требуется сложных крупногабаритных измерительных станций. Схема автомата предусматривает 100% повторные измерения диаметра роликов и автоматическую компенсацию смещения уровня настройки преобразователей измерительных станций.

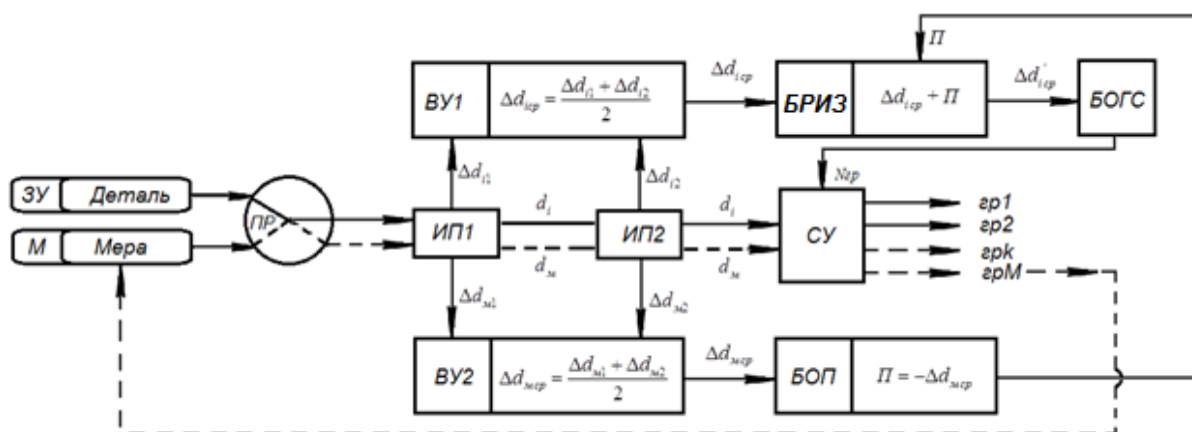


Рис.6 – Блок-схема самоподнастраивающегося КСА для контроля диаметров и сортировки роликов подшипников на размерные группы

Принцип действия КСА следующий. Контролируемые детали диаметром d_i из загрузочного устройства ЗУ подаются на первую измерительную позицию ИП1, а затем на вторую позицию ИП2. Результаты измерения диаметров Δd_{i1} на позиции ИП1 и Δd_{i2} на позиции ИП2 поступают в вычислительное устройство ВУ1, где определяется среднее арифметическое значение результатов измерения

$$\Delta d_{icp} = \frac{\Delta d_{i1} + \Delta d_{i2}}{2}. \quad (11)$$

Применение повторного измерения диаметров Δd_{i2} и нахождение среднего арифметического Δd_{icp} повышает точность измерения за счет

сокращения случайной составляющей погрешности измерения. После измерения диаметра на второй позиции ролик подается к сортировочному устройству $СУ$, а вычисленное значение Δd_{icp} поступает в блоки расчета исправленного значения результата измерения $БРИЗ$ и определения группы сортировки $БОГС$, где определяется номер группы сортировки ролика и формируется управляющая команда $N_{гp}$ на заслонку сортировочного устройства $СУ$ и деталь поступает в соответствующий бункер $гp1...гpk$.

Для компенсации систематической составляющей погрешности измерения в схеме КСА предусмотрена периодическая подача из лотка M на измерительные позиции $ИП1$ и $ИП2$ вместо контролируемой детали рабочего эталона (меры), размер которого d_m соответствует номинальному значению размеров контролируемых деталей, и по которому осуществляется настройка на «нуль» преобразователей измерительных позиций. Подача меры на позиции измерения в соответствии с заданным циклом осуществляется переключателем $ПР$. Измеренные на позициях $ИП1$ и $ИП2$ значения меры Δd_{m1} и Δd_{m2} поступают в вычислительное устройство $ВУ2$, где определяется их среднее арифметическое отклонение

$$\Delta d_{m\text{ ср}} = \frac{\Delta d_{m1} + \Delta d_{m2}}{2}, \quad (12)$$

а затем в блок $БОП$ определения поправки $П$ к результату расчета $\Delta d_{i\text{ ср}}$ размеров контролируемых роликов

$$П = -\Delta d_{m\text{ ср}}. \quad (13)$$

Затем в блоке $БРИЗ$ определяется исправленное значение $\Delta d'_{i\text{ ср}}$ результата измерения диаметра ролика (значение результата измерения, не содержащее систематической составляющей погрешности)

$$\Delta d'_{i\text{ ср}} = \Delta d_{i\text{ ср}} + П. \quad (14)$$

По исправленному значению $\Delta d'_{i\text{ ср}}$ диаметра ролика в блоке $БОГС$ формируется команда, подаваемая в сортировочное устройство.

Мера после измерения диаметра d_{m2} на второй позиции $ИП2$ поступает в сортировочное устройство $СУ$, а затем в бункер $гpM$ и возвращается в лоток M .

Заключение.

1. Применение повторных измерений для уменьшения случайной составляющей погрешности в КСА с последовательным циклом снижает их производительность $\Delta Q = f(n_n)$ всего на 3,4...4,3% при $n_n = 10\%$ деталей с повторными измерениями, на 17...21% при $n_n = 50\%$ деталей и даже при 100%-ном повторном контроле снижение производительности не

превышает $\Delta Q \leq 43\%$, в диапазоне производительности СКА $Q = 500 \dots 1000$ шт/час с постоянным значением времени вспомогательных операций $t_{всп} = const$.

2. С увеличением производительности КСА с последовательным циклом от 500 до 1000 шт/час (в два раза) при $t_{всп} = const$ процент снижения составляет $\Delta Q = 0,9\%$ при $n_n = 10\%$; $\Delta Q = 4,5\%$ при $n_n = 50\%$ и $\Delta Q = 9,0\%$ при $n_n = 100\%$.

3. При постоянном значении времени измерения $t_{изм} = const$ в диапазоне производительности КСА $Q = 500 \dots 1000$ шт/час снижение производительности автомата с повторными измерениями растет от 23 до 38,5% при $n_n = 100\%$; от 12,5 до 19,25% при $n_n = 50\%$; от 2,3 до 3,85 при $n_n = 10\%$.

4. Согласно расчетных данных (таблицы 1 и 2) и графиков (Рис.4) в КСА с последовательным циклом целесообразно при $Q < 890$ шт/час в качестве постоянного параметра цикла использовать $t_{изм} = const$ время измерения, а при $Q > 890$ шт/час – параметр $t_{всп} = const$ время вспомогательных операций. В этом случае снижение производительности не будет превышать $\Delta Q \leq 3,6\%$ при $n_n = 10\%$; $\Delta Q \leq 18\%$ при $n_n = 50\%$ и $\Delta Q \leq 36\%$ при $n_n = 100\%$ повторных измерений деталей и сохранении расчетной величины скорости вращения детали на измерительной позиции n_d и динамических характеристик преобразователя.

5. Применение в КСА с параллельным циклом измерения второй измерительной позиции для компенсации случайной составляющей погрешности позволяет реализовать повторные измерения 100% деталей без сокращения производительности КСА, а использование режима самоподнастройки за счет введения поправок в результат измерения позволяет также компенсировать и систематическую составляющую погрешности.

Библиографический список.

1. Бирюков Г.С. Измерение геометрических величин и их метрологическое обеспечение : учеб. пособ. для студ. сред. спец. учеб. зав. / Г.С. Бирюков, А.Л. Серко. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 384с.
2. Волосов С.С. Приборы автоматического контроля в машиностроении / С.С. Волосов, Е.И. Педь. – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
3. Городецкий Ю.Г. Приборы и автоматы для контроля подшипников: [Справочник] / Ю.Г. Городецкий, Б.И. Мухин, Э.П. Савенок и др. – М. : Машиностроение, 1973. – 256 с.
4. Дашенко А.И. Автоматизация процессов в машиностроении / А.И. Дашенко. – М. : Высш. шк., 1991. – 480с.
5. Замятин В.К. Технология и оснащение сборочного производства / В.К. Замятин – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
6. Копп В.Я. Анализ дифференциальной энтропии при многократных технических измерениях в машино-приборостроении / В.Я. Копп,

- А.А. Скидан, А.И. Балакин, О.В. Филипович// Весн. СевГТУ: Сб. науч. тр. – Севастополь. – 2008. – Вып. 93. – С. 164-171.
7. Копп. В.Я. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино- приборостроении / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь : Крымский Издательский Дом, 2020. – 340 с.
8. Копп В.Я. Оптимальная оценка числа измерений приборных систем / В.Я. Копп, А.А. Скидан, А.И. Балакин и др. // 36. наук. праць СНУЯЕтаП. – Вип.1(21). – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2007. – С. 231-238.
9. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении : учеб. пособие / В.П. Легаев. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с. – ISBN 978-5-89368-980-8.
10. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация : учебник / И.М. Лифиц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт-Издат, 2003. – 318 с.
11. РМГ 64–2003 «ГСИ. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений».
12. Сорочкин Б.М. Средства для линейных измерений / Б.М. Сорочкин, Ю.З. Тененбаум, А.П. Курочкин. – Л. : Машиностроение, 1978. – 264 с.
13. Теория и проектирование контрольных автоматов : учеб. пособие для втузов / Л.Н. Воронцов, С.Ф. Корндорф, А.В. Федотов [и др.]. – М. : Высш. школа, 1980. – 560 с. : ил.
14. Этингоф М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингоф – М. : АПР, 2016. – 336 с.

¹*Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Balakina Natalia Anatolievna, Senior Lecturer, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Васютенко А.П.¹, Балакина Н.А.²

TENZOMETRIC WEIGHING DEVICE

Vasyutenko A.P.¹, Balakina N.A.²

Аннотация. Приведена структурная схема весоизмерительной системы, конструкция измерительного устройства на базе тензометрических преобразователей и методика его расчета. Сформулирована цель работы. Приведены выражение, описывающее статическую характеристику измерительного устройства и результаты моделирования характеристик при различных сочетаниях конструктивных параметров. Рассчитаны чувствительности измерения, позволяющие определять числовые значения параметров устройства, обеспечивающие заданный диапазон и точности измерения.

Abstract. The paper presents a structural diagram of a weighing system, the design of a measuring device based on strain gauge transducers, and a method for calculating it. The purpose of the work is formulated. The paper presents an expression describing the static characteristic of the measuring device and the results of modeling the characteristics for various combinations of design parameters. The paper calculates the measurement sensitivities, which allow determining the numerical values of the device parameters that ensure the specified range and measurement accuracy.

Ключевые слова. Измерение, тензопреобразователь, чувствительность, статическая характеристика, пружинный параллелограмм.

Keywords. Measurement, strain gauge, sensitivity, static characteristic, spring parallelogram.

Введение.

В целом ряде производственных процессов важнейшие показатели работы предприятий определяются по результатам взвешивания сырья, полуфабрикатов и готовых изделий. Весы являются составной частью производственного процесса: их встраивают в технологические линии, они имеют различные приспособления и наряду с определением массы выполняют и другие функции, например, сортировку изделий и контроль точности, дозирование компонентов для составления смесей, фасовку, упаковку и т.д. [4,7].

Дозаторы применяют в химической, пищевой промышленности, производстве пластмасс, красителей, бетона и т.д. При автоматизации производственных процессов к дозирующим устройствам предъявляют повышенные требования. В ряде процессов необходимо дозирование по сложной рецептуре, включающей в себя несколько десятков компонентов. Применение электротензометрии позволяет полностью автоматизировать эти процессы. Использование в дозаторах печатающих и самопишущих

приборов, регистрирующих результаты, дает возможность полностью контролировать процессы производства [2,5,10].

Важная роль в обеспечении высокого качества продукции автоматизированных производств принадлежит автоматическим устройствам, предназначенным для контроля массы на различных этапах технологических процессов.

Тензорестивные преобразователи обладают достаточной точностью, позволяют выполнять дистанционные измерения, благодаря малогабаритным размерам, позволяют производить измерения в относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции многомерных устройств для контроля точности масс объектов измерения [1,3,8,9].

Целью статьи является разработка методики расчета конструктивных параметров тензопреобразователя для создания весоизмерительных устройств как с малым диапазоном измерения и высокой чувствительностью, так и устройств с широким диапазоном измерения и чувствительностью, удовлетворяющей требуемой точности измерения на основе моделирования их статических характеристик.

Структурная схема весоизмерительной системы дозатора показана на Рис.1.

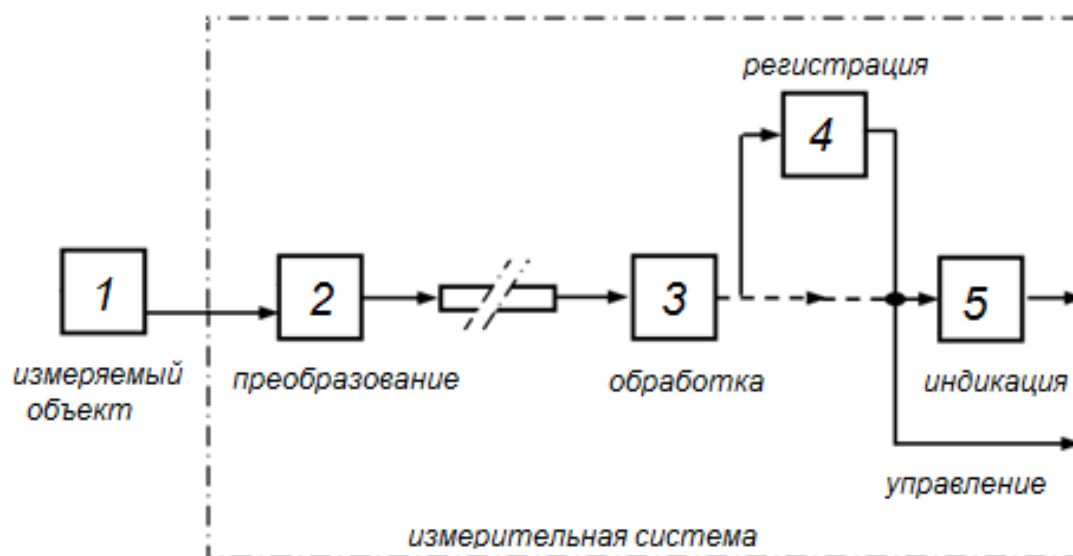


Рис.1 – Структурная схема весоизмерительной системы

Описание схемы.

В датчике 2 входной измеряемый параметр (масса объекта 1) преобразуется в электрический выходной сигнал, несущий информацию об исходной измеряемой величине, которая в дальнейшем обрабатывается с помощью средств микропроцессорной техники в блоке 3, а затем регистрируется в устройстве 4 и отображается в блоке индикации 5. Блок обработки 4 сигнала измерительной информации формирует управляющие команды в схему весового дозатора. На Рис.2 показано весоизмерительное устройство, предназначенное для контроля массы дозы сыпучего материала с целью периодической проверки точности работы ленточного

дозатора и формирования команд на подналадку дозатора в случае, если масса дозы не соответствует заданным предельным значениям.

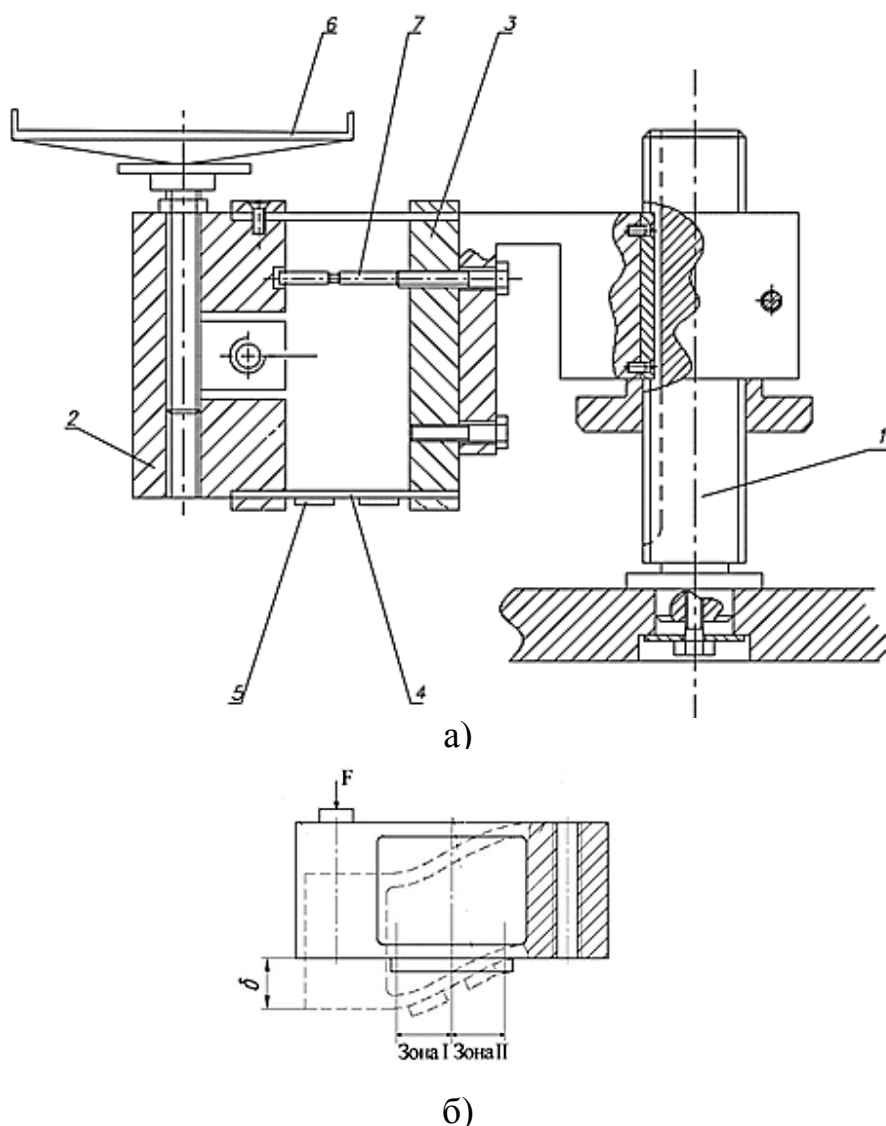


Рис.2 – Весоизмерительное устройство: а) конструкция устройства;
б) схема деформации пружинного параллелограмма

Измерительное устройство закреплено на стойке 1, с возможностью вертикального перемещения (Рис.2,а). Устройство включает в себя, подвижную каретку 2, неподвижную каретку 3, связанные пружинным параллелограммом, образованным двумя прямыми плоскими пружинами 4. На нижней пружине закреплены два тензопреобразователя 5, включенные в полу-мостовую измерительную схему. На подвижной каретке 2, установлена чаша 6, весоизмерительной установки. Стойка 7 служит для ограничения хода подвижной каретки 2 пружинного параллелограмма, и величины деформации прямой плоской пружины 4 с тензопреобразователями 5. Принцип действия устройства следующий. При нагружении чаши 6 дозой сыпучего материала пружинный параллелограмм деформируется, при этом один из тензопреобразователей

5 получает деформацию растяжения (зона 1), а другой сжатия (зона 2 Рис.2,б).

Методика расчета весоизмерительного устройства [6] с чувствительным элементом в виде пружинного параллелограмма с двумя тензопреобразователями включает следующие этапы:

– выбор материала прямых плоских пружин и его характеристик – модуля упругости E и допускаемого напряжения на изгиб $[\sigma_u]$;

– определение исходных данных – максимального усилия нагрузки $P_{\max}$; величины деформации пружин параллелограмма Δx ; длины L , ширины b , толщины h прямых плоских пружин и типа тензопреобразователей и их параметров (базовой длины ℓ , сопротивления R_0 и максимального тока $I_{\max}$);

– расчет коэффициента жесткости k_x пружинного параллелограмма [4]

$$k_x = 2Eb \left(\frac{h}{L} \right)^3;$$

– расчет усилия P при деформации пружинного параллелограмма на величину Δx

$$P = 2Eb \left(\frac{h}{L} \right)^3 \Delta x;$$

– расчет максимального напряжения изгиба $\sigma_{u \max}$

$$\sigma_{u \max} = 3E \left(\frac{\Delta x \cdot h}{L^2} \right) \leq [\sigma_u];$$

– определение относительной максимальной деформации $\varepsilon_{x \max}$ плоской пружины

$$\varepsilon_{x \max} = [\sigma_u] / E;$$

– расчет максимального относительного изменения сопротивления $\Delta R / R_0$ преобразователя

$$\Delta R / R_0 = k \cdot \varepsilon_{x \max};$$

– определение напряжения питания U_n равноплечего моста с двумя активными плечами

$$U_n = 2I_{\max} \cdot R_0;$$

– расчет напряжения на выходе моста $U_{m \times}$

$$U_{мх} = \frac{U_n \cdot \Delta R}{2R_0}.$$

В таблице 1 представлены исходные данные для расчета тензопреобразователя. По результатам моделирования, графикам и таблицам, определены значения чувствительности и построены соответствующие графики. Тензопреобразователи в конструкции весоизмерительного прибора закреплены на нижней плоской пружине плоско-пружинного параллелограмма.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета преобразователя

№ п/п	Наименование параметра	Значения		
1	Толщина плоской пружины (h), мм	2,5	2,0	1,5
2	Ширина тензобалки (b), мм	30	40	50
3	Константа (k)	2		
4	Длина тензобалки (L), мм	50	56	65
5	Масса (m_x), кг	0,2 – 1,5		

На Рис.3-5 показаны зависимости напряжения $U_{мх}$ на выходе измерительного моста с тензопреобразователями $U_{мх} = f(m_x)$ от массы m_x сыпучего материала, при различных значениях длины L , ширины b , толщины h плоских пружин, рассчитанные по формуле:

$$U_{мх} = \frac{g \cdot U_n \cdot k \cdot L}{2E \cdot W} \cdot m_x,$$

где $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ – момент сопротивления изгибу одной плоской пружины.

По графикам (Рис.3-5) статических характеристик весоизмерительного устройства определены числовые значения чувствительности измерения $k_{И} = \frac{\Delta U_{м}}{\Delta m_x}$.

На Рис.6-8 представлены зависимости чувствительности измерения $k_{И}$ от длины $k_{И} = f(L)$, ширины $k_{И} = f(b)$ и толщины $k_{И} = f(h)$ пружин параллелограмма.

Анализ расчетных данных и графических зависимостей позволяет определить значения чувствительности измерения массы при различных сочетания конструктивных параметров пружинного параллелограмма, на плоской пружине которого наклеены проволоочные тензопреобразователи, являющиеся чувствительными элементами весоизмерительного устройства. Расчетные значения чувствительности $k_{И}$ измерения массы определены для участков характеристик $U_{мх} = f(m_x)$ с наибольшей чувствительностью при различных сочетаниях конструктивных параметров пружинного параллелограмма: толщины плоской пружины h , ширины пружины b и ее длины L (таблица 2).

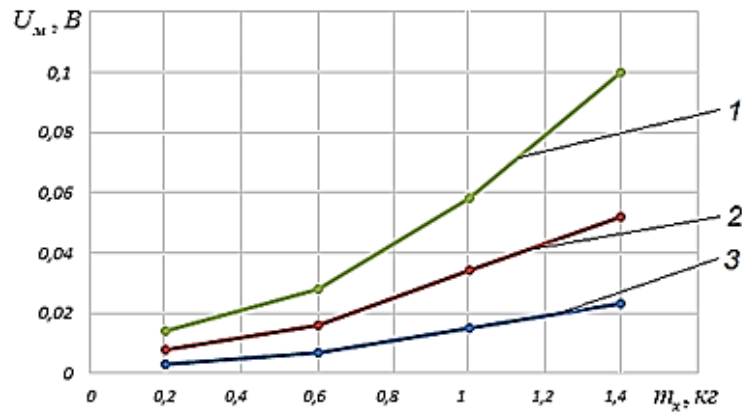


Рис.3 – Зависимость $U_{m x} = f(m_x)$ для $b=30; 40; 50$ мм при $L = 56$ мм и $h = 2,0$ мм

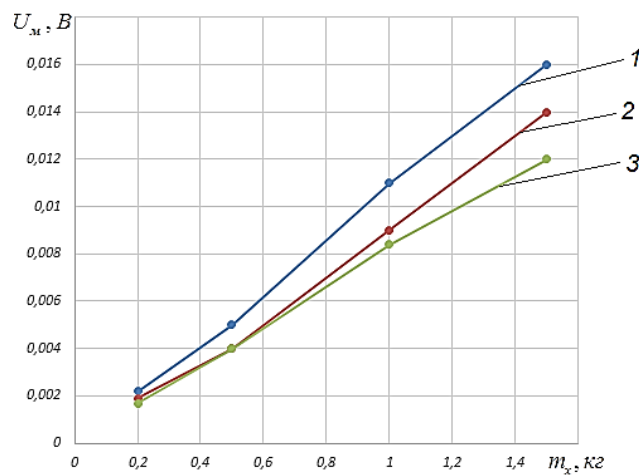


Рис.4 – Зависимость $U_{m x} = f(m_x)$ для $L=50; 56; 60$ мм при $b = 40$ мм и $h = 2,0$ мм

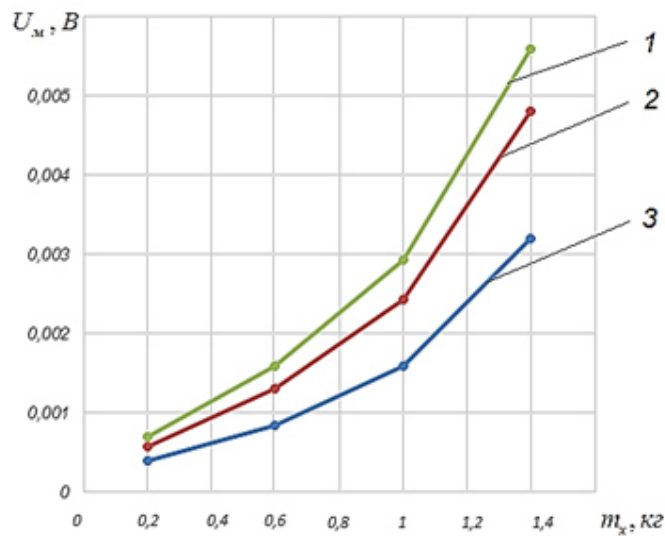


Рис.5 – Зависимость $U_{m x} = f(m_x)$ для $h=1,5; 2,0; 2,5$ мм при $L = 56$ мм и $b = 40,0$ мм

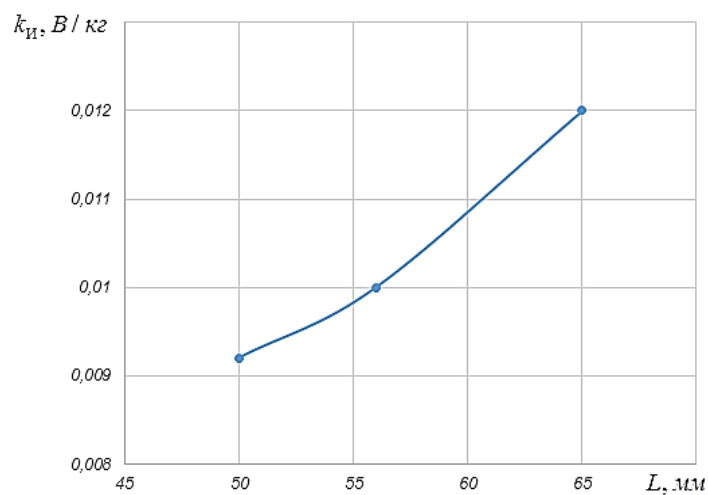


Рис.6 – Зависимость $k_{\text{И}} = f(L)$ при $L=65; 56; 50$ мм

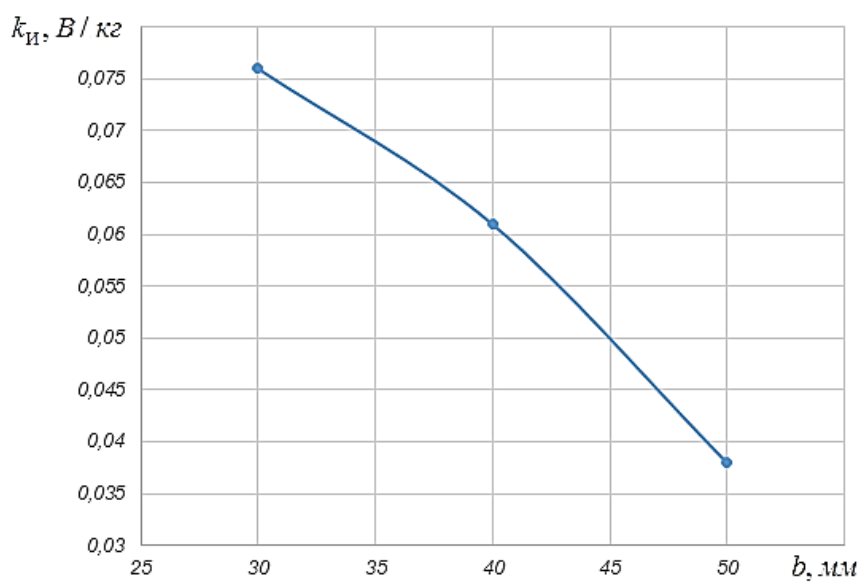


Рис.7 – Зависимость $k_{\text{И}} = f(b)$ при $b=30; 40; 50$ мм

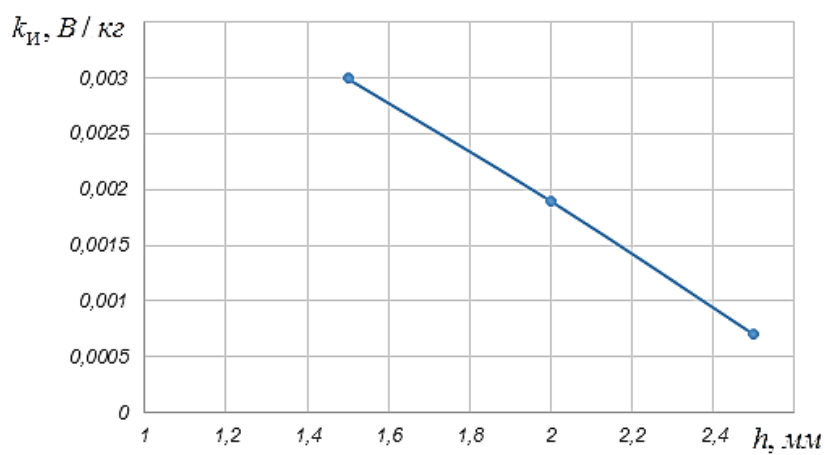


Рис.8 – Зависимость $k_{\text{И}} = f(h)$ при $h=1,5; 2,0; 2,5$ мм

Анализ расчетных данных и графических зависимостей позволяет определить значения чувствительности измерения массы при различных сочетания конструктивных параметров пружинного параллелограмма, на плоской пружине которого наклеены проволоочные тензопреобразователи, являющиеся чувствительными элементами весоизмерительного устройства. Расчетные значения чувствительности $k_{\text{И}}$ измерения массы определены для участков характеристик $U_{mx} = f(m_x)$ с наибольшей чувствительностью при различных сочетаниях конструктивных параметров пружинного параллелограмма: толщины плоской пружины h , ширины пружины b и ее длины L (таблица 2).

Наибольшая чувствительность измерения соответствует минимальным значениям толщины h , ширины b , и максимальной длине L плоской пружины параллелограмма.

Диапазон чувствительности лежит в пределах от 0,0007 до 0,076 В/мм для принятых конструктивных значений $h=1,5...2$ мм, $b=30...50$ мм, $L=50...65$ мм.

Таблица 2 – Значение чувствительности $k_{\text{И}}$ весоизмерительного устройства

Обозначение	h , мм			b , мм			L , мм		
	1,5	2	2,5	30	40	50	50	56	65
Чувствительность, $k_{\text{И}}$, В/мм	0,003	0,0019	0,0007	0,076	0,061	0,038	0,0092	0,01	0,012

Заключение.

Проведенные исследования показывают возможность получения необходимого сочетания конструктивных параметров пружинного параллелограмма тензопреобразователя, обеспечивающих требуемую чувствительность и, как следствие, точность измерения на заданном диапазоне контроля массы. Таким образом, представленная методика расчета конструктивных параметров тензопреобразователя может использоваться при создании весоизмерительных устройств и систем с различными диапазонами измерения и соответствующей им чувствительности, обеспечивающей заданную точность.

Библиографический список.

1. Васютенко А.П. Измерительные преобразователи и приборы: теория, исследование, расчет : практикум / А.П. Васютенко, Д.В. Заморёнова, Н.А. Балакина [и др.]. – М. : ИНФРА-М, 2024. – 270 с. – DOI 10.12737/2052421.
2. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: практикум : учебное пособие для студентов вузов / Е.В. Пашков [и др.] ; ред. Е.В. Пашков. – Севастополь : Издательство Севастопольского национального технического университета, 2010. – 224 с. : ил. – ISBN 978-966-2960-79-2.
3. Васютенко А.П. Расчет параметров элементов приборов : учебно-

- методическое пособие к выполнению практических занятий по дисциплине «Конструирование элементов приборов» для студентов всех форм обучения технических направлений / А.П. Васютенко, Н.А. Балакина, Л.В. Ефремова. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 106 с.
4. Шалыгин М.Г. Автоматизация измерений, контроля и испытаний : учебное пособие / М.Г. Шалыгин, Я.А. Вавилин. – СПб. : Издательство «Лань», 2022. – 172 с. : ил.
5. Гуревич А.Л. Автоматическое дозирование жидких сред / А.Л. Гуревич, М.В. Соколов. – Л. : Химия, 1987. – 396 с. : ил.
6. Шушпанников А.Б. Моделирование процесса порционного дозирования / А.Б. Шушпанников, Б.А. Федосенков // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – № 2(17). – С. 105-109.
7. Сеницын Б.Н. Дозаторы непрерывного действия – средство автоматизации процессов весового дозирования / Б.Н. Сеницын, А.С. Ерошкин. – М. : ЦНИИТЭИ приборостроения, 1982. – 48 с. : ил. ; 21 см.
8. Латышенко К.П. Технические измерения и приборы: методы анализа и контроля : учебник для вузов / К.П. Латышенко. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2025. – 392 с. – ISBN 978-5-534-20950-1.
9. Зудин В.Л. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий : учебник для вузов / В.Л. Зудин, Ю.П. Жуков, А.Г. Маланов. – 2-е изд. – М. : Издательство Юрайт, 2025. – 199 с. – ISBN 978-5-534-17162-4.
10. Дозатор весовой ДВ – 500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.consit.ru/dlya-dozirovaniya/dozatory-s-prisytkoj>.

¹*Васютенко Александр Павлович, канд. техн. наук, доц., доцент, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

Vasyutenko Alexander Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Balakina Natalia Anatolievna, Senior Lecturer, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ С АНАЛОГОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

Бурлака В.В.¹

ANALOG CAMERA IMAGE PROCESSING MODULE FOR UNMANNED VEHICLES

Burlaka V.V.¹

Аннотация. В работе предложен простой в изготовлении модуль, позволяющий проводить несложный анализ изображения, получаемого с аналоговой видеокамеры. Такой модуль может быть использован, например, на беспилотных аппаратах для облегчения решения задач стабилизации и визуальной навигации, либо для автоматического обнаружения в кадре движущихся объектов. Схема построена на однокристальном микроконтроллере с ядром Cortex-M4. Для связи с внешними устройствами предусмотрено два асинхронных последовательных порта и выходы ШИМ сигналов. Имеется также возможность переключения сигнала от разных видеокамер, а также выполнять простое шифрование видеосигнала, включающее сокрытие синхронизационных импульсов.

Abstract. The paper proposes a simple-to-manufacture module that allows for simple analysis of image received from an analog video camera. Such a module can be used, for example, on unmanned vehicles to facilitate the solution of stabilization and visual navigation tasks, or for automatic detection of moving objects in the image from camera. The circuit is built around a single-chip microcontroller with a Cortex-M4 core. Two asynchronous serial ports and PWM signal outputs are provided for communication with external devices. It is also possible to switch signals from different cameras, as well as to perform simple encryption of the video signal, including hiding synchronization pulses.

Ключевые слова. Обработка изображения, аналоговый видеосигнал, визуальная одометрия, беспилотный аппарат, оптическое отслеживание объекта.

Keywords. Image processing, analog video signal, visual odometry, unmanned vehicle, optical object tracking.

Введение.

При эксплуатации беспилотных аппаратов и при проектировании систем управления ими возникают задачи определения истинного перемещения в пространстве и стабилизации положения. Особенно актуальны эти задачи для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1].

Задачи визуальной навигации и стабилизации БПЛА не являются новыми, на сегодняшний день известно множество технических и алгоритмических решений, использующих глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS/GLONASS/BeiDou [2] и средства компьютерного зрения. Приемники ГНСС позволяют обеспечить

определение координат БПЛА с точностью менее 1 м, относительно дешевы и просты в использовании. Но к их недостаткам следует отнести невозможность работы в определенных условиях (например, в плотной городской застройке, или в условиях искусственного подавления сигналов ГНСС).

Системы визуальной навигации не зависят от сигналов ГНСС и позволяют определить положение БПЛА на основе анализа изображений с бортовых видеокамер, а также (если требуется) выполнять картографирование местности [3,4]. Но они имеют ряд характерных особенностей: невозможность работы над некоторыми поверхностями (при отсутствии деталей ландшафта, например, поверхность воды, пустыня, снежное поле), влияние условий освещения (блики, тени).

Для улучшения точности навигации могут применяться оба метода – как ГНСС, так и визуальный [5,6]. Кроме того, визуальный метод навигации не ограничен обработкой сигналов только видимой части электромагнитного спектра – возможно использование камер ночного видения или тепловизоров.

Решение задачи визуальной навигации требует достаточно большой вычислительной мощности и качественных изображений с видеокамер [7,8]. Поэтому аппаратная реализация подобных систем зачастую выполняется как минимум на одноплатных компьютерах с цифровыми видеокамерами. Это обстоятельство определяет повышенную стоимость таких систем и ограничивает их распространение в системах управления БПЛА низшего ценового класса. Существуют недорогие датчики перемещения с интегрированными камерами видимого диапазона (например, PMW3901 с частотой кадров до 121 Гц), но они непригодны для работы в условиях низкой освещенности и имеют жестко фиксированный функционал без возможности модификации.

Целью настоящей работы является создание программно-аппаратного комплекса, оптимизированного по условию минимума стоимости, позволяющего ограниченно реализовать функции определения перемещения БПЛА над подстилающей поверхностью.

Основная часть.

Для решения поставленной задачи с минимальными требованиями к вычислительной мощности и минимальной стоимостью видеокамеры была выбрана концепция корреляционной обработки изображения, получаемого с аналоговой видеокамеры. При этом обработке подвергается не весь кадр, а выделенное окно (т.н. ROI – Region Of Interest) небольшого размера. Более того, оцифровка полного цветного телевизионного сигнала (ПЦТС) с видеокамеры производится после его пропускания через фильтр нижних частот (ФНЧ), подавляющий сигналы цветовых поднесущих. Таким образом, дальнейшей обработке подвергается изображение в оттенках серого. Программное обеспечение выполняет корреляционный анализ выделенного окна, его сопоставление с опорным кадром и определение относительного перемещения изображения. Схожие функции выполняют датчики, применяемые в оптических мышках, с тем исключением, что в качестве опорного кадра в них выступает предыдущий отснятый кадр, а ROI как таковое отсутствует (равно размеру кадра). Следует заметить, что высокое разрешение этих оптических датчиков определяется не столько

размером кадра (он как раз очень невелик – $16 \times 16 \dots 32 \times 32$ пикселя), сколько частотой кадров, которая составляет от 500 до более 7000 кадров в секунду [9]. В случае использования аналоговой видеокамеры частота кадров фиксирована, определена стандартом и составляет: для стандарта PAL – 50 Гц, для стандарта NTSC – 60 Гц [10]. Поскольку используется чересстрочная развертка, количество строк в полном кадре составляет 625 (PAL) или 525 (NTSC) при 25 или 30 кадрах в секунду соответственно. В разработанном модуле выполняется обработка каждого полукадра, что улучшает качество отслеживания перемещения объектов на изображении. Предусмотрена также возможность переключения между несколькими видеокамерами (например, камерой видимого диапазона и тепловизором, имеющим выход сигнала ПЦТС).

Принципиальная электрическая схема модуля приведена на Рис.1.

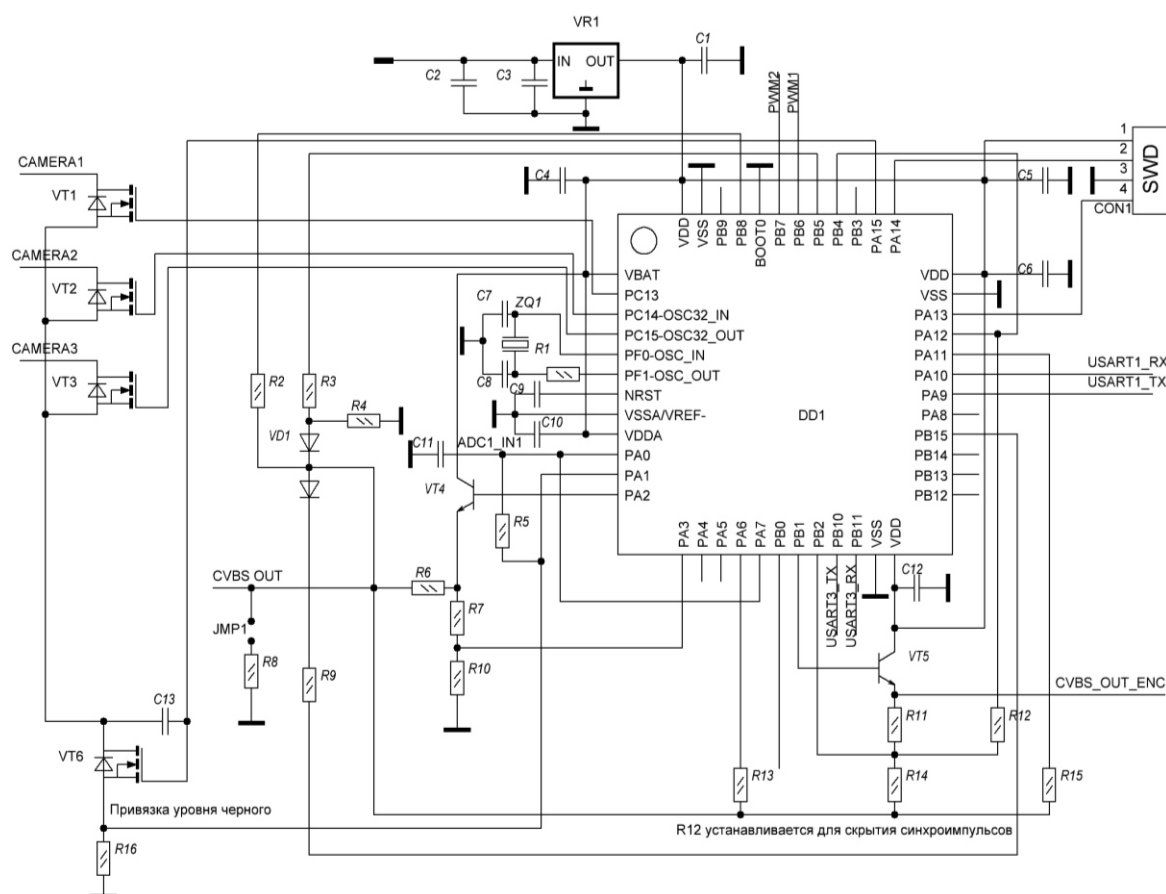


Рис.1 – Схема электрическая принципиальная разработанного модуля обработки изображения

Модуль построен на основе однокристального микроконтроллера STM32F303CCT6 [11], имеющего развитую бортовую периферию для работы с аналоговыми сигналами, быстродействующие бортовые АЦП и процессорное ядро Cortex-M4, в систему команд которого входят эффективные специализированные инструкции для решения задач цифровой обработки сигналов.

Сигналы ПЦТС с видеокамер (CAMERA1, CAMERA2, CAMERA3) подаются на вход мультиплексора, выполненного на полевых транзисторах

VT1 – VT3 с низким пороговым напряжением. Управление затворами этих транзисторов осуществляется с выводов контроллера. Следует заметить, что входные емкости VT1 – VT3 имеют порядок сотен пикофарад – единиц нанофарад, а это значит, что подключение их затворов к низкоимпедансному источнику сигнала приведет к образованию паразитного ФНЧ, образованного выходным сопротивлением активной камеры (обычно 75 Ом) и входными емкостями VT1 – VT3. Для исключения этого эффекта управление затворами VT1 – VT3 осуществлено путем переключения «подтягивающих» резисторов на соответствующих выводах. Таким образом, последовательно с затворами оказываются включены резисторы сопротивлением 20...40 кОм, что практически исключает влияние шунтирования видеосигнала входными емкостями VT1 – VT3 и улучшает частотную характеристику узла мультиплексирования.

Сигнал выбранной видеокамеры затем поступает на узел привязки уровня черного, выполненный на VT6 и C13. Назначение этого узла – смещение видеосигнала вниз по напряжению таким образом, чтобы уровень синхронизирующих импульсов [12] находился в пределах 0...20 мВ – это необходимо для корректной работы схемы вывода информации в кадр (OSD – On Screen Display). Как показала практика, у некоторых аналоговых камер уровень синхронизирующих импульсов может составлять 100...300 мВ и даже доходить до 500 мВ.

Транзистор VT6 с конденсатором C13 образуют в первом приближении интегрирующее звено с входным сигналом, определяемым током вывода PA15 контроллера DD1. Указанный вывод программно управляется за счет включения «подтягивающих» резисторов, т.е. имеет выходное сопротивление 20...40 кОм. Конденсатор C13 выбран так, чтобы напряжение на нем изменялось не более, чем на 1 мВ, за время, равное длительности одной строки изображения (64 мкс). Благодаря большой крутизне характеристики VT6 его напряжение затвор-исток изменяется не более, чем на 0,6 мВ, в диапазоне токов, имеющем место при работе схемы (до 20 мА), а следовательно, и напряжение сток-исток VT6 остается относительно постоянным. Изменять же это напряжение можно за счет переключения состояния вывода PA15 контроллера. В программе реализовано измерение уровня синхроимпульса каждой строки изображения и управление «подтягивающими» резисторами вывода PA15: при низком уровне синхроимпульса включается «подтяжка вверх» (pullup), в противном случае – «подтяжка вниз» (pulldown). Это приводит к медленному заряду или разряду C13, а значит, и изменению напряжения сток-исток VT6. Поскольку VT6 включен последовательно с источником сигнала – видеокамерой – то напряжение на нагрузочном резисторе R16 будет определяться как разность напряжения сигнала с камеры и напряжения сток-исток VT6. Это позволяет поддерживать напряжение на VT6 таким, чтобы уровень синхронизации ПЦТС на R16 был заданным (т.е. 0...20 мВ).

Сигнал с R16 далее поступает через ФНЧ R5C11, ослабляющий сигналы цветowych поднесущих, на вход бортового АЦП и вход одного из бортовых компараторов DD1 (выводы PA0, PA7). Компаратор осуществляет выделение синхроимпульсов из видеосигнала путем

сравнения его с опорным уровнем, определяемым бортовым цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) DD1 на выводе PA4. Выход компаратора подключен к бортовому таймеру TIM3 DD1, сконфигурированному в режиме захвата ШИМ сигнала, что позволяет легко селективировать кадровые, строчные и уравнивающие импульсы.

Кроме этого, сигнал с R16 подается на буферный повторитель, выполненный на одном из бортовых операционных усилителей (ОУ) DD1 (выводы PA1, PA2, PA3). Этот ОУ имеет слабый выход (допустимое сопротивление нагрузки не менее 4 кОм), поэтому для его упрочнения применен буферный эмиттерный повторитель на VT4. Типовая частота единичного усиления ОУ, равная 8,2 МГц, позволяет обеспечить качественную буферизацию видеосигнала, имеющего типовую полосу частот 5,5...6 МГц.

С выхода буферного каскада с коэффициентом усиления +2 видеосигнал через резистор R6 поступает на выход модуля CVBS OUT. К этой же точке подключена диодная сборка VD1 и резисторы R2, R15, входящие в состав схемы OSD.

Схема вывода информации в кадр (OSD) выполнена с использованием двух бортовых модулей SPI (Serial Peripheral Interface) контроллера DD1. Выход первого SPI (PB5) подключен через делитель R3R4, имеющий коэффициент деления 3, и один из диодов сборки VD1 к выходу видеосигнала. К этой же точке через второй диод сборки VD1 и резистор R9 подключен выход второго SPI (PB15). При появлении логической единицы на выходе PB5 происходит «подтяжка» уровня выходного видеосигнала к напряжению около 1 В (т.е. уровню белого). Появление же логического нуля на PB15 приводит к «подтяжке» уровня видеосигнала к напряжению примерно 0,2...0,3 В (прямое напряжение диода Шоттки VD1), т.е. уровню черного. При работе алгоритма OSD оба модуля SPI используются для формирования синхронизированных со строчными синхроимпульсами последовательностей, приводящих к отображению на экране монитора требуемой информации.

Резисторы R2 и R15 подключены к выходам бортового таймера TIM4 DD1 и используются для реализации функции «подсветки» на экране заданной области (ROI и обнаруженное положение опорного кадра). Для этого реализована синхронизация таймера со строчными синхроимпульсами и используется режим формирования комбинированной ШИМ последовательности.

В схеме предусмотрена возможность получения инвертированного видеосигнала. Для этого использован еще один бортовой ОУ DD1 и элементы VT5, R11, R14, образующие инвертирующий усилитель с коэффициентом передачи -1 и выходным буферным повторителем на VT5. Смещение на неинвертирующем входе ОУ определяется вторым бортовым ЦАП DD2 на выводе PA5. При использовании инвертирующего каскада следует установить перемычку JMP1, которая подключает к прямому выходу видеосигнала нагрузочный резистор R8. Инвертированный видеосигнал снимается с эмиттера VT5.

Для усложнения идентификации инвертированного сигнала по синхроимпульсам предусмотрена возможность скрытия синхроимпульсов путем установки резистора R12 между инверсным входом ОУ и выходом

компаратора уровня синхронизации. В этом случае имеет место двойная инверсия синхроимпульсов, в результате чего они смещаются в область уровней сигнала яркости, что затрудняет их обнаружение. Однако для восстановления видеосигнала после такого преобразования потребуется более сложный декодер на приемной стороне, способный обнаружить скрытую синхропоследовательность и заново ее сформировать.

Тактирование микроконтроллера DD1 осуществляется от встроенной петли ФАПЧ, опорной частотой для которой является сигнал бортового кварцевого генератора, работающего с элементами ZQ1, C7, C8, R1. Питание DD1 стабильным напряжением +3,3 В осуществляется от стабилизатора VR1.

В модуле предусмотрены два выхода ШИМ сигналов (PB6, PB7) и два асинхронных последовательных порта (USART1, USART3) для связи с внешними устройствами.

Алгоритм работы модуля следующий.

Для выявления перемещения изображения сначала производится поиск области кадра, в которой есть мелкие детали или контуры (т.е. элементы, позволяющие в дальнейшем идентифицировать эту область). Эта область сохраняется в ОЗУ контроллера как опорный кадр. Затем ведется отслеживание перемещения опорного кадра на изображении с камеры путем корреляционного анализа, составления массива схожести (confidence map) и поиска максимума в этом массиве. При потере опорного кадра (максимальное значение в массиве confidence map ниже порогового) или подходе опорного кадра к границе видимой области производится повторный поиск опорного кадра.

При поиске опорного кадра оцифрованное изображение в оттенках серого обрабатывается следующим образом. Представим изображение в виде двумерного массива пикселей $p_{x,y}$. На первом этапе рассчитывается массив градиентов следующим образом:

$$d_{x,y} = |p_{x,y+1} - p_{x,y-1}| + |p_{x+1,y} - p_{x-1,y}|.$$

Затем рассчитывается массив сумм градиентов:

$$S_{x,y} = \sum_{v=y}^{y+CY-1} \sum_{u=x}^{x+CX-1} d_{u,v},$$

где CX, CY – размеры опорного кадра в пикселях.

После чего в полученном массиве находится элемент с максимальным значением. Его координаты в массиве и принимаются за координаты опорного кадра, данные которого копируются из массива градиентов.

Отслеживание перемещения опорного кадра производится по следующему алгоритму. После оцифровки изображения так же рассчитывается массив градиентов $d_{x,y}$; затем выполняется расчет массива confidence map:

$$C_{x,y} = \frac{\left(\sum_{v=0}^{CY-1} \sum_{u=0}^{CX-1} d_{u+x,v+y} \cdot r_{u,v} \right)^2}{\sum_{v=0}^{CY-1} \sum_{u=0}^{CX-1} \left(d_{u+x,v+y} \right)^2 \cdot \left(\sum_{v=0}^{CY-1} \sum_{u=0}^{CX-1} \left(r_{u,v} \right)^2 \right)},$$

где $r_{u,v}$ – массив значений (яркостей) пикселей опорного кадра.

После этого выполняется поиск максимального значения в полученном массиве, сравнение его с пороговым значением и проверка близости к границам экрана.

Из-за ограниченных вычислительных ресурсов примененного однокристального микроконтроллера размер опорного кадра выбран небольшим – 30×40 пикселей; допустимое перемещение за один кадр составляет 6 пикселей (т.е. размер ROI составляет 42×52 пикселя). Выполняется обработка каждого полукадра с камеры, чересстрочная развертка игнорируется.

Для целей отладки реализована подсветка ROI и подсветка области опорного кадра.

При написании кода широко использовались приемы программирования и оптимизации, обеспечивающие максимальное быстродействие при выполнении расчетов. На Рис.2 приведено фото платы описанного модуля обработки изображения.



Рис.2 – Внешний вид разработанного модуля обработки изображения

На Рис.3 показаны фотографии экрана монитора при работе модуля.



Рис.3 – Примеры работы разработанного модуля обработки изображения в режиме отслеживания заданного объекта

Область ROI (прямоугольная) выделена повышенной яркостью. Внутри ROI более ярко выделена область опорного кадра. Внизу экрана видны текстовые надписи, являющиеся работой подсистемы OSD. Использовалась аналоговая видеокамера, работающая в стандарте PAL.

Габариты печатной платы разработанного модуля составляют 43×43 мм, что позволяет устанавливать его на раму FPV БПЛА, в стойку с полетным контроллером.

Заключение.

Предложено схемное решение и разработано программное обеспечение модуля обработки изображений с аналоговой видеокамеры, позволяющее обеспечить решение задачи визуальной одометрии. Модуль спроектирован с оптимизацией по минимуму себестоимости, имеет выходы ШИМ и последовательные порты для связи с внешними устройствами. Реализована также возможность шифрования видеосигнала путем инверсии и скрывания синхроимпульсов. Применение разработанного модуля совместно с полетным контроллером может позволить расширить круг решаемых БПЛА задач за счет реализации функции визуальной навигации и/или оптической стабилизации.

Дальнейшим направлением работы является модификация алгоритмов обработки изображения для повышения универсальности и расширения области применения разработанного модуля. Перспективными задачами представляются следующие:

- обнаружение приближения/удаления объекта слежения;
- обнаружение поворота объекта слежения;
- введение динамического обновления опорного кадра для повышения устойчивости отслеживания;
- введение динамического изменения размера опорного кадра;
- введение динамического изменения параметров усреднения яркостных данных входных кадров с видеокамеры;
- введение дополнительных алгоритмов выделения контуров и автоматического выбора наиболее целесообразного для данной визуальной обстановки;
- введение режима управления приводами поворотного подвеса камеры с целью слежения за объектом;
- введение режима поиска в кадре движущихся объектов;
- введение режима «моста» между приемником команд управления и полетным контроллером с целью реализации функций автоматического управления полетом.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

Библиографический список.

1. Dong J. UAV Vision aided INS/odometer integration for Land Vehicle Autonomous Navigation / J. Dong, X. Ren, S. Han [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – Vol. 71. – Iss. 5. – P. 4825-4840. – DOI: 10.1109/TVT.2022.3151729.
2. Hui Y. An unmanned air vehicle (UAV) GPS location and navigation system / Y. Hui, C. Xhiping, X. Shanjia [et al.] // ICMMT'98. 1998 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.

- Proceedings (Cat. No.98EX106), Beijing, China, 18-20 August 1998. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2002. – P. 87-105. – DOI: 10.1109/ICMMT.1998.768328.
3. Bresson G. Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving / G. Bresson, Z. Alsayed, L. Yu [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2017. – Vol. 2. – Iss. 3. – P. 194–220. – DOI: 10.1109/TIV.2017.2749181.
 4. Wang S. Coarse Semantic-Based Motion Removal for Robust Mapping in Dynamic Environments / S. Wang, X. Lv, J. Li [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 74048-74064. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2989317.
 5. Alarcón F. A Precise and GNSS-Free Landing System on Moving Platforms for Rotary-Wing UAVs / F. Alarcón, M. García, I. Maza [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – Iss. 4. – P. 886-895. – DOI: 10.3390/s19040886.
 6. Hao Y. A Modified Extended Kalman Filter for a Two-Antenna GPS/INS Vehicular Navigation System / Y. Hao, A. Xu, X. Sui [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – Iss. 11. – P. 38-49. – DOI: 10.3390/s18113809.
 7. Blösch M. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments / M. Blösch, S. Weiss, D. Scaramuzza [et al.] // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, AK, USA, 3-7 May 2010. – Piscataway, NJ, USA : IEEE Operations Center, 2010. – 8 p. – DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509920.
 8. Xie X. A Monocular Visual Odometry Method Based on Virtual-Real Hybrid Map in Low-Texture Outdoor Environment / X. Xie, T. Yang, Y. Ning [et al.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Iss. 10. – 20 p. DOI: 10.3390/s21103394.
 9. Optical Mouse Sensors : Каталог Avago Technologies Limited. – 2007. – URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Avago%20PDFs/ToolKitSelectionGuide.pdf> (дата обращения: 27.10.2025).
 10. Martin S. Understanding Video Timing with Digital Video Encoders / S. Martin // Intersil Technical Brief TB368. – 1998. – Vol. 6 – 3 p.
 11. STM32F303CB Datasheet : STMicroelectronics. – 2018. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303cb.pdf> (date of request: 03.11.2025).
 12. ГОСТ 7845-92. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений. Введ. 01.01.1993. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 27 с.

¹Бурлака Владимир Владимирович, д-р техн. наук, доцент, директор Научно-технического центра, vburlaka@rambler.ru, Россия, Мариуполь, ФГБОУ ВО «Приазовский государственный технический университет» – филиал НИУ МГСУ

Burlaka Vladimir Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, vburlaka@rambler.ru, Russia, Mariupol, Pryazovskiy State Technical University – branch of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОДНАЛАДКИ БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Балакин А.И.¹, Васютенко А.П.²

STUDY ON THE ACCURACY OF ADJUSTING CENTERLESS GRINDING MACHINES

Balakin A.I.¹, Vasyutenko A.P.²

Аннотация. Приведена схема обработки и измерения деталей на бесцентрово-шлифовальном станке, сформулирована цель работы. Представлены график изменения размеров деталей при подналадке и зависимости погрешности обработки и подналадки бесцентрово-шлифовальных станков от параметров процесса обработки и точности измерительного устройства. Приведены результаты моделирования погрешности подналадки для различных методов формирования управляющей команды: по одной детали (импульсу), по повторным импульсам, по среднему арифметическому. Дана сравнительная оценка погрешности подналадки для указанных методов.

Abstract. The scheme for the processing and measurement of components on a centreless grinding machine is presented, along with the objectives of the work. A graph illustrating the variation in component dimensions during setup is included, as well as the relationships between machining error and the setup of centreless grinding machines, influenced by processing parameters and the accuracy of the measuring device. The results of simulating setup errors for various methods of generating control commands are provided: for a single component (impulse), for repeated impulses, and for the arithmetic mean. A comparative assessment of the setup errors for the specified methods is also given.

Ключевые слова. Бесцентровое шлифование, подналадка, метод формирования команды на подналадку, погрешность подналадки.

Keywords. Centreless grinding, adjustments, team formation method for adjustments, adjustment error.

Введение.

Точность обработки деталей, возможность выхода размеров обработанных деталей за пределы интервала допуска связаны с рядом технологических погрешностей, таких как износ режущего инструмента, тепловых и силовых деформаций узлов станка. Систематические технологические погрешности вызывают постепенное изменение размеров обработанных деталей и могут быть скомпенсированы периодическим изменением уровня настройки станка по результатам измерения обработанных деталей [1-3,6,7].

На Рис.1 [4,5] представлена схема обработки и измерения деталей на бесцентрово-шлифовальном станке [4,5]. Применение средств контроля в зоне обработки деталей 4 на бесцентрово-шлифовальных станках затруднено вследствие их конструктивных особенностей, связанных со

свободным базированием обрабатываемых деталей на ноже 3 и наличием двух бабок. На бабке 1 установлен шлифовальный круг, а на бабке 2 – круг, выполненный из грубого абразивного или резино-подобного абразивного материала, и предназначен для прижима деталей к базирующему ножу и шлифовальному кругу 1.

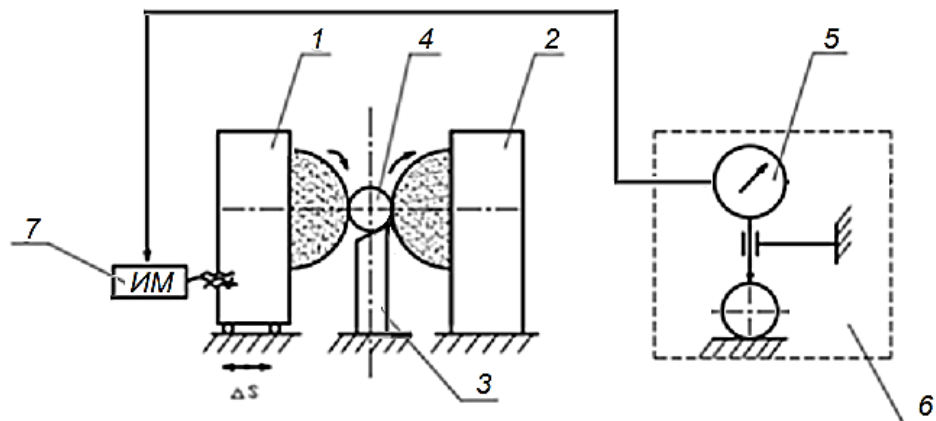


Рис.1 – Схема обработки и измерения деталей на бесцентрово-шлифовальном станке: 1 – ведущая шлифовальная бабка; 2 – вспомогательная шлифовальная бабка; 3 – нож; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – отсчетно-командное устройство; 6 – измерительная позиция; 7 – исполнительный механизм.

После обработки на станке детали поступают на позицию измерения 6. Если размер детали приближается к границе интервала допуска, то отсчетно-командным устройством 5 формируется команда исполнительному механизму 7 на подналадку положения шлифовальной бабки 1 и компенсации погрешности обработки, связанной с износом шлифовальных кругов и тепловыми деформациями узлов станка. Удаленность измерительной позиции от зоны обработки вызывает запаздывание управляющих команд и зависимость точности обработки от числа деталей, находящихся между позициями обработки и измерения. В связи с этим возникает необходимость проведения анализа и определения взаимосвязи между технологическими погрешностями, погрешностью средства измерения и точностью подналадки станка.

Цель работы – повышение точности обработки деталей на бесцентрово-шлифовальных станках за счет автоматического изменения уровня их настройки на основе исследования погрешности подналадки при различных методах формирования управляющих команд.

Погрешность обработки включает в себя две основных составляющих: случайную (σ) и систематическую (M) [8-10]:

$$T = 6\sigma + M .$$

Случайная составляющая погрешности обработки вызывается колебанием припуска на обработку, твердости материала детали, случайной кинематической погрешности станка. Систематическая составляющая погрешности вызывается погрешностью настройки станка, износом режущего инструмента и изменением взаимного расположения узлов станка вследствие тепловых деформаций.

Подналадчики компенсируют функциональную технологическую погрешность, которая вызывает постепенное изменение размеров детали с течением времени.

Если в качестве величины подналадочного импульса A принимать M (систематическую составляющую погрешности обработки), то погрешность обработки при использовании подналадчика определяется по формуле:

$$\Delta_{обр} = A + 6\sigma + \Delta_{И} + B, \quad (1)$$

где A – величина подналадочного импульса; B – рассеивание положения центра группирования размеров деталей в момент подналадки; $\Delta_{И}$ – погрешность измерения; σ – среднее квадратическое погрешности обработки.

На Рис.2 представлен график изменения размеров при подналадке [11].

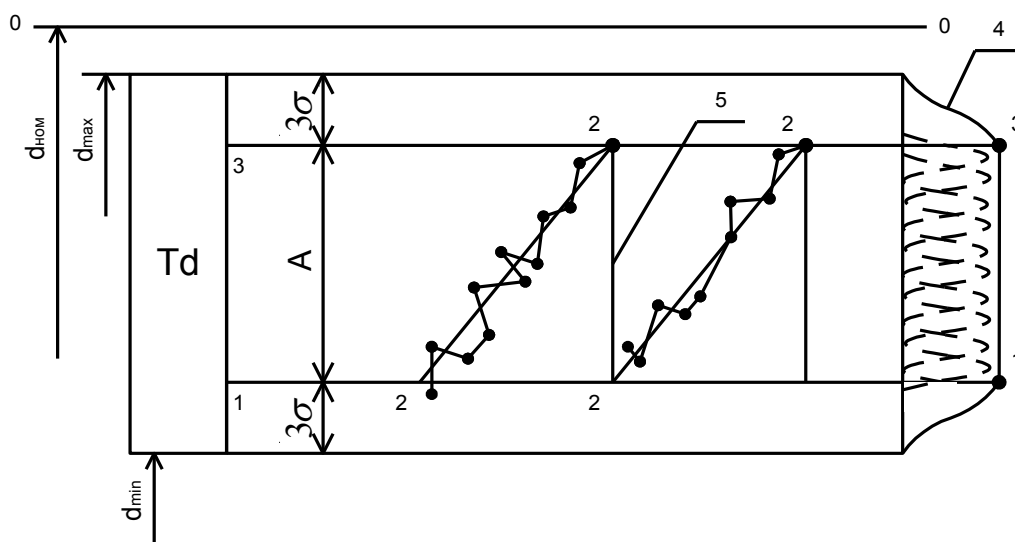


Рис.2 – График изменения размеров деталей при подналадке

По мере износа шлифовальных кругов размеры детали при наружном шлифовании постепенно увеличиваются и приближаются к верхней границе поля допуска. Смещение усреднённых значений размеров обработанных деталей показано линией 2-2. Линии 1-1 и 3-3, характеризующие настройку бесцентрово-шлифовального станка, расположены на 3σ ниже (выше) верхней (нижней) границы поля допуска погрешности измерения. Кривая 4 показывает суммарное распределение погрешностей размеров деталей.

Процесс подналадки осуществляется следующим образом. По мере износа инструмента центр группирования размеров обработанных деталей перемещается по линии 2-2, приближаясь к границе подналадки (линия 3-3). При выходе размера какой-либо детали за линию настройки, соответствующей границе подналадки, измерительный преобразователь срабатывает и отсчетное устройство формирует команду на подналадку станка, в результате выполнения которой шлифовальная бабка перемещается на величину A . Центр группирования размеров смещается

вниз на величину A , затем по мере износа круга перемещается по направлению к линии настройки до появления детали с размером, при котором срабатывает измерительный преобразователь, и так далее.

Важным этапом, обеспечивающим требуемую точность обработки деталей, является выбор метода формирования команды на подналадку бесцентрово-шлифовального станка по результатам измерения обработанных деталей. Рассматриваются следующие методы формирования команд на подналадку (подналадка станка по одному импульсу, по повторным импульсам, по среднему арифметическому) и дается сравнительная оценка точности подналадки при различных методах формирования команд.

Метод подналадки по одной детали реагирует в большей степени на случайные отклонения размеров, что может привести к выдаче ложных команд на подналадку. Поэтому его целесообразно использовать при малых значениях среднего квадратического отклонения погрешности обработки.

На точность систем регулирования с формированием команд по повторным импульсам в меньшей степени влияют грубые (резко выделяющиеся) погрешности обработки и измерения. Этот метод значительно уменьшает вероятность подачи ложной команды исполнительному механизму станка по сравнению с подналадкой по одной детали.

Дальнейшим развитием статистических систем регулирования размеров являются подналадка станка по среднему арифметическому или медиане выборки деталей. С помощью данных методов можно в значительной степени избежать влияния грубых ошибок измерения и устранить возможность возникновения повторных подналадочных импульсов, а также частично исключить влияние собственно случайных погрешностей обработки.

Погрешность подналадки Δ_n зависит от величины рассеивания B положения центра группирования в момент подналадки. Параметр B является функцией систематической погрешности обработки деталей, приходящейся на одну обрабатываемую деталь (a) и среднего квадратического отклонения погрешности обработки. Величина параметра B определяется в зависимости от способа формирования команды на подналадку. Выражения для расчета параметра B , B' , B_S для различных методов формирования команд «подналадка» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Выражения для определения параметров B , B' , B_S

По одному импульсу	По повторным импульсам	По среднему арифметическому
$B = 4\sigma^{0,75} \cdot a^{0,25}$	$B' = K^{(-0,25+0,12\frac{a}{\sigma})} \cdot B$	$B_S = N^{-0,37} \cdot B$

Величина погрешности подналадки Δ_n вычисляется по формулам:
– при подналадке по одному импульсу:

$$\Delta_n = A + \Delta_{II} + B;$$

– при подналадке по повторным импульсам:

$$\Delta_n = A + \Delta_{II} + B' ;$$

– при подналадке по среднему арифметическому:

$$\Delta_n = A + \Delta_{II} + B_S ,$$

где Δ_{II} – погрешность измерения детали.

С учетом выражения (1), погрешность обработки деталей на бесцентрово-шлифовальном станке при использовании подналадчика определяется из выражения:

$$\Delta_{обр} = 6\sigma + \Delta_n .$$

Построение зависимостей погрешности подналадки от способа формирования команды на подналадку проводится при параметрах подналадочной системы, представленных в таблице 2. При расчете погрешности подналадки Δ_n погрешность измерений Δ_{II} принималась равной 25% от величины подналадочного импульса A , что соответствует принятому соотношению допускаемой погрешности измерения $[\delta_{изм}]$ и допуску на изготовление детали IT , $[\delta_{изм}] = (0,1 \dots 0,3) \cdot IT$.

Таблица 2 – Параметры подналадочной системы

№ п/п	Наименование параметра, мкм	Значение, мкм
1	Погрешность измерения, Δ_{II}	1,0; 1,5; 2,5
2	Величина подналадочного импульса, A	10; 7; 4
3	Среднеквадратическое отклонение погрешности обработки, σ	0,5; 1,0; 1,5
4	Систематическая погрешность обработки, приходящаяся на одну деталь, a	0,25 ... 0,01

На Рис.3-5 показаны зависимости смещения центра группирования $B = f(a)$, $B = f(\sigma)$ и погрешности подналадки $\Delta_n = f(B)$ при различных значениях систематической составляющей погрешности a , приходящейся на одну деталь, среднего квадратического отклонения обработки σ , величины подналадочного импульса A и погрешности измерения Δ_{II} при подналадке по одной детали.

На Рис.6,7 показаны зависимости $B' = f(B)$, $\Delta_n = f(B')$ для различных значений A при формировании команды на подналадку по повторным импульсам.

Зависимости смещения центра группирования B_S для подналадки по среднему арифметическому от смещения центра группирования B при подналадке по одному импульсу при различных значениях среднеквадратического отклонения погрешности обработки σ и систематической составляющей погрешности обработки a , приходящейся на одну деталь и при величине выборки $N=5; 25$, представлены на Рис.8.

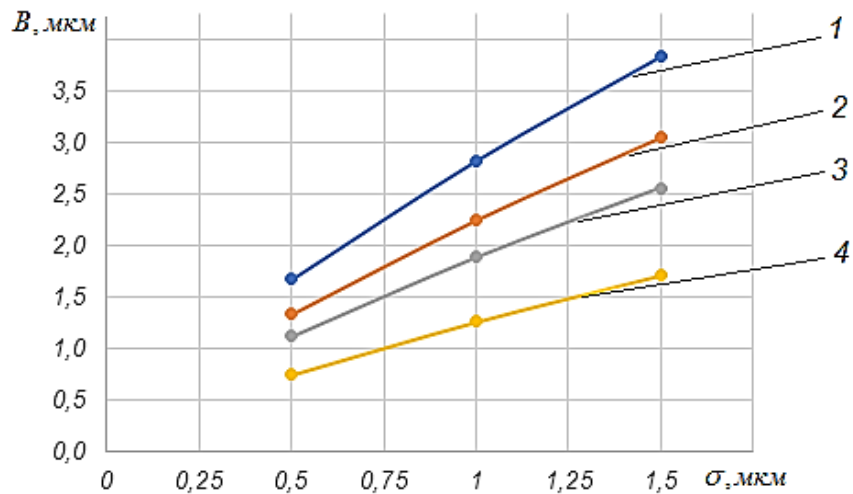


Рис.3 – Зависимость $B = f(\sigma)$: 1 – при $a=0,25$ мкм; 2 – при $a=0,1$ мкм; 3 – при $a=0,05$ мкм; 4 – $a=0,01$ мкм

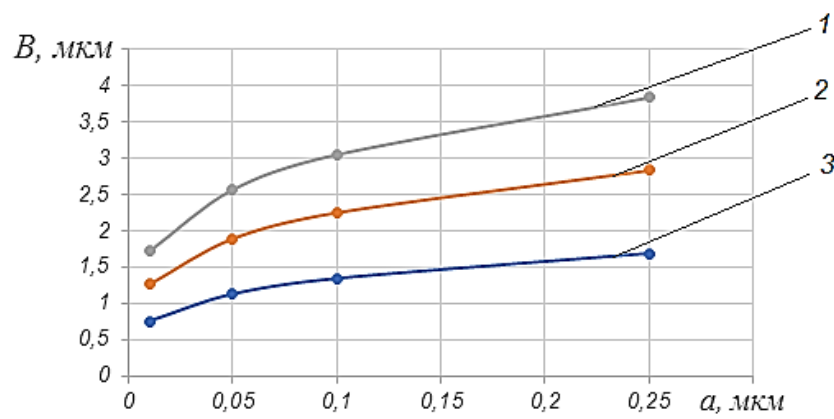


Рис.4 – Зависимость $B = f(a)$: 1 – при $\sigma=1,5$ мкм; 2 – при $\sigma=1$ мкм; 3 – при $\sigma=0,5$ мкм

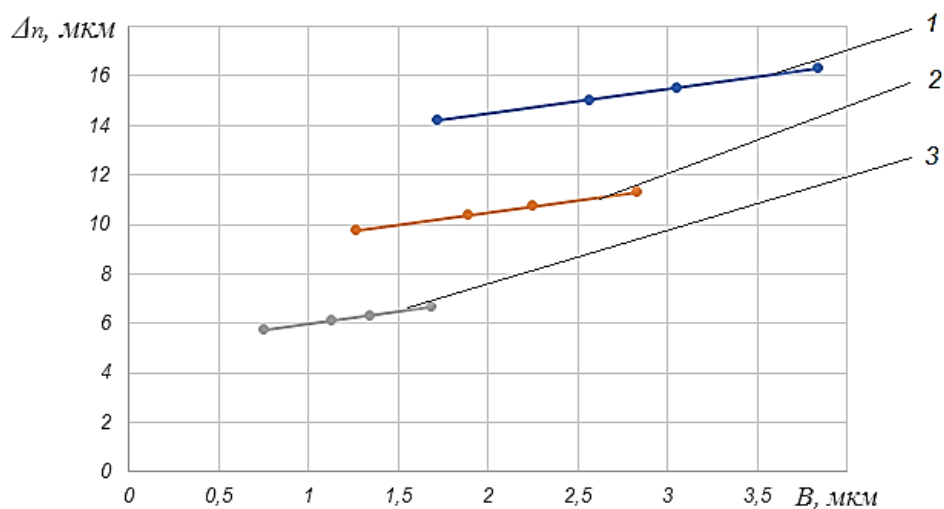


Рис.5 – Зависимость $\Delta_n = f(B)$: 1 – при $A=10$ мкм; 2 – при $A=7$ мкм; 3 – при $A=4$ мкм

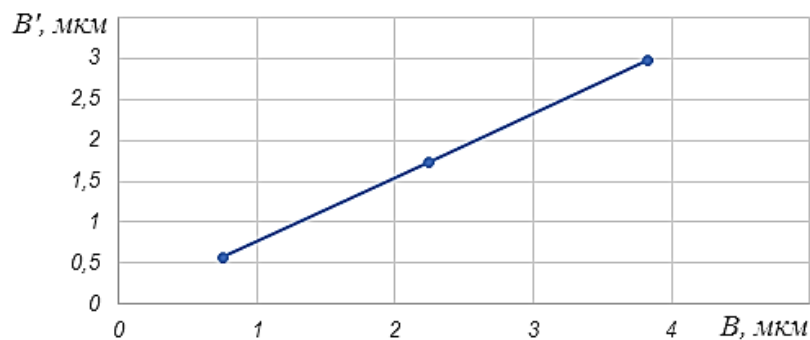


Рис.6 – Зависимость $B' = f(B)$ при $K = 3$ – числе повторных импульсов

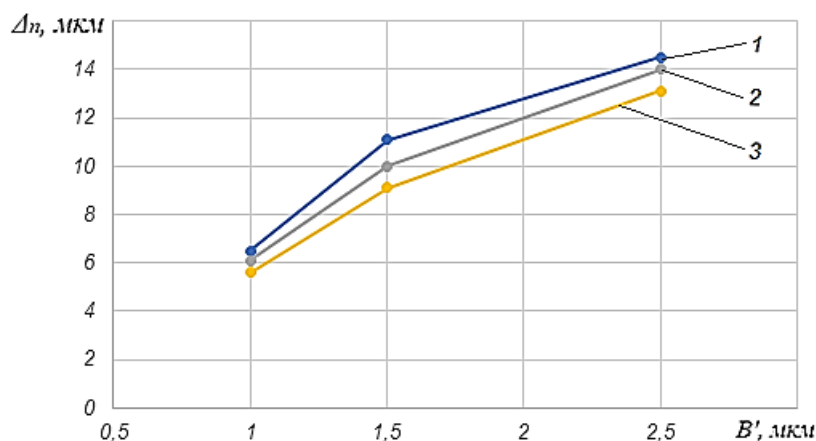


Рис.7 – Зависимость $\Delta_n = f(B')$: 1 – при $A=10$ мкм; 2 – при $A=7$ мкм; 3 – при $A=4$ мкм и формировании команды по повторным импульсам

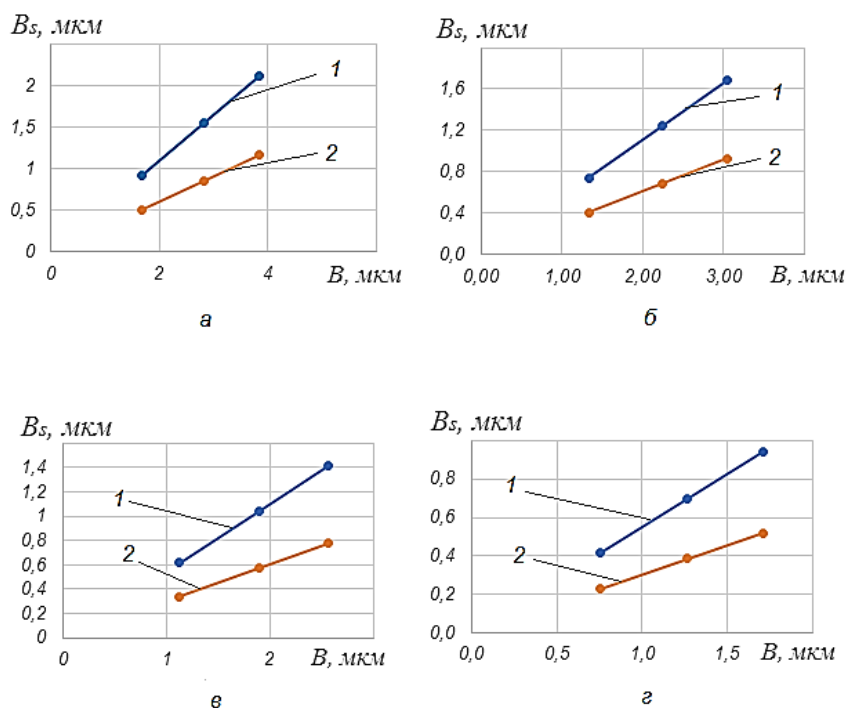


Рис.8 – Зависимости $B_s = f(B)$ при величине выборки 1 – при $N=5$; 2 – при $N=25$: а – при $a=0,15$ мкм; б – при $a=0,1$ мкм; в – при $a=0,05$ мкм; г – при $a=0,01$ мкм

Зависимость погрешности подналадки Δ_n станка по среднему арифметическому от величины смещения центра группирования B_S при $A=4; 7; 10$ мкм для числа деталей выборки $N=5$ представлена на Рис.9, а при выборке $N=25$ – на Рис.10.

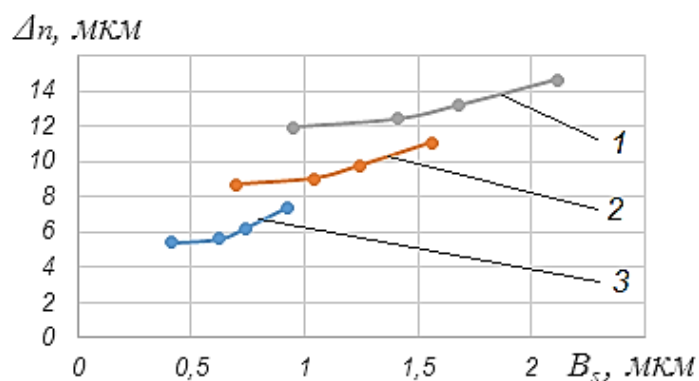


Рис.9 – Зависимость $\Delta_n = f(B_S)$ для величины выборки $N=5$: 1 – при $A=10$ мкм; 2 – при $A=7$ мкм; 3 – при $A=4$ мкм

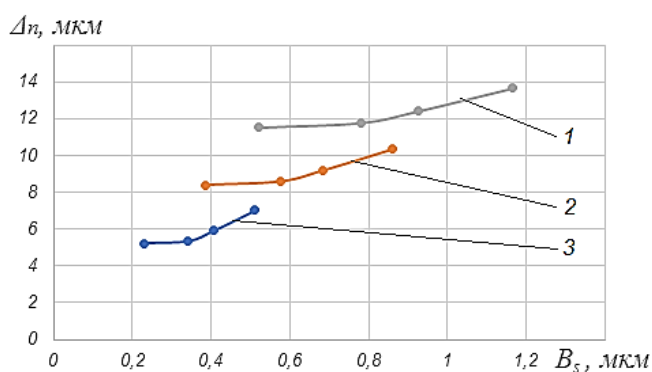


Рис.10 – Зависимость $\Delta_n = f(B_S)$ для величины выборки $N=25$: 1 – при $A=10$ мкм; 2 – при $A=7$ мкм; 3 – при $A=4$ мкм

Закключение.

Анализ графических зависимостей, представленных на Рис.5,7,9,10 и описывающих функцию погрешности подналадки от величины смещения центра группирования при различных методах формирования команд, позволяет оценить точность подналадки. Сравнивая значения параметров B рассеивания центра группирования в момент подналадки, можно сделать вывод, что при формировании команды по повторным импульсам величина B' в 1,3 раза меньше величины B при подналадке по одному импульсу. Значения погрешностей подналадки при различных методах формирования команды подналадку по одному импульсу, повторным импульсам при $K=3$ и среднему арифметическому $N=25$ представлены в таблице 3.

2. Анализ расчетов показывает, что применение методов формирования команд на подналадку по повторным импульсам и среднему арифметическому позволяет повысить точность обработки на бесцентрово-шлифовальном станке. Применение метода формирования команд по

среднему арифметическому при размере выборки $N=5$ уменьшает погрешность подналадки на 10...15%, применение метода формирования команд по повторным импульсам при $K=3$ уменьшает погрешность подналадки на 5...8% по сравнению с методом формирования команд по одному импульсу.

Таблица 3 – Значения погрешности подналадки Δ_n

Метод формирования команд		Значения погрешности подналадки Δ_n , мкм								
		По одному импульсу			По повторным импульсам			По среднему арифметическому		
A , мкм		4	7	10	4	7	10	4	7	10
Δ_H , мкм		1,0	1,5	2,5	1,0	1,5	2,5	1,0	1,5	2,5
Параметр подналадки	0,25	6,7	11,3	16,3	6,5	11,1	14,5	7,0	10,4	13,6
	0,1	6,3	10,8	15,6	6,1	10,0	14,0	5,6	9,2	12,2
	0,01	5,8	9,8	14,2	5,6	9,1	13,1	5,2	8,5	11,6

3. Увеличение числа повторных импульсов K и объема выборки N позволяет увеличить точность подналадки и уменьшить величину погрешности Δ_n .

4. Применение метода формирования команд по среднему арифметическому при размере выборки $N=25$ уменьшает погрешность подналадки по сравнению с методом формирования команд по одному импульсу на 15...20%, что в 1,3...1,5 раза меньше погрешности подналадки станка при $N=5$.

Библиографический список.

1. Педь Е.И. Активный контроль в машиностроении/ Е.И. Педь. – М.: Изд-во Машиностроение, 1991. – 359 с.
2. Этингоф М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.И. Этингоф – М. : АПР, 2016. – 336 с.
3. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В.П. Легаев. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с. – ISBN 978-5-89368-980-8.
4. Волосов С.С. Приборы для автоматического контроля в машиностроении: учеб. пособие для вузов. по специальности «Приборы точной механики» / С.С. Волосов, Е.И. Педь. – 2-е изд. – М.: Издательство стандартов, 1975. – 336 с.
5. Волосов С.С. Управление качеством продукции средствами активного контроля / С.С. Волосов, З.Ш. Гейлер. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 197 с.
6. Соболев М.П. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках / М.П. Соболев, М.И. Этингоф. – Смоленск: Ойкумена, 2005. – 300 с.
7. Высоцкий А.В. Приборы автоматического управления обработкой на металлорежущих станках / А.В. Высоцкий, И.Б. Карпович, М.П. Соболев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – 328 с.
8. Гейлер З.Ш. Самоподнастраивающиеся системы активного контроля /

- З.Ш. Гейлер. – М. : Машиностроение, 1972. – 176 с.
9. Гейлер З.Ш. Самоподнастраивающиеся системы активного контроля / З.Ш. Гейлер. – М. : Машиностроение, 1978. – 224 с.
10. Копп В.Я. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино-приборостроении / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь: Крымский Издательский Дом, 2020. – 340 с.
11. Васютенко А.П. Роботизированный самоподнастраивающийся измерительный модуль / А.П. Васютенко, А.И. Балакин // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2023. – № 3(23). – С. 84-92.

¹*Балакин Алексей Игоревич, канд. техн. наук, доц., доцент, AIBalakin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Васютенко Александр Павлович, канд. техн. наук, доц., доцент, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Balakin Alexey Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, AIBalakin@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Vasyutenko Alexander Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, APVasutenko@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol,

ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В БЕСЩЁТОЧНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА: МЕТОДЫ И ОЦЕНКА ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ

Теткин И.Ю.¹, Рафиков М.Б.², Калинин И.А.³, Марченко Ю.Г.⁴

TORQUE MEASUREMENT IN BRUSHLESS DC MOTORS: METHODS AND ASSESSMENT OF THE LIMITS OF APPLICABILITY

Tetkin I.Y.¹, Rafikov M.B.², Kalinin I.A.³, Marchenko Y.G.⁴

Аннотация. В статье рассматриваются методы измерения крутящего момента бесщёточных двигателей постоянного тока (BLDC), применяемых в робототехнике, медицинском оборудовании, а также беспилотной авиации. Проведён анализ тензометрических, реактивных, косвенных токовых, а также инерционных методов, выявлены их преимущества и ограничения с точки зрения точности, стоимости и сложности проведения испытаний. Разработана концепция малогабаритного лабораторного стенда на базе контроллера Arduino/STM32, позволяющего получать данные с погрешностью 5–10 % в диапазоне моментов до 2 Н·м и частот вращения до 40 000 об/мин. Показано, что предложенный подход обеспечивает низкую стоимость, простоту конструкции и широкие возможности учебного применения. Определены ограничения инерционного метода: чувствительность к шумам датчиков, необходимость калибровки потерь и учёта дисбаланса маховика. Результаты исследования демонстрируют перспективность предложенного метода для испытаний электродвигателей малой мощности в лабораторных условиях.

Abstract. The article discusses methods for measuring the torque of brushless DC motors (BLDC) used in robotics, medical equipment, and unmanned aircraft. The analysis of strain gauges, reactive, indirect current, and inertial methods has been carried out, and their advantages and limitations in terms of accuracy, cost, and complexity of testing have been identified. The concept of a small-sized laboratory stand based on the Arduino/STM32 controller has been developed, which allows obtaining data with an error of 5-10% in the range of torques up to 2 Nm and rotational speeds up to 40,000 rpm. It is shown that the proposed approach provides low cost, simplicity of design and wide possibilities of educational application. The limitations of the inertial method are determined: sensitivity to sensor noise, the need to calibrate losses and take into account the imbalance of the flywheel. The results of the study demonstrate the prospects of the proposed method for testing low-power electric motors in laboratory conditions.

Ключевые слова. Крутящий момент, бесщёточный двигатель постоянного тока, механическая характеристика, инерционный стенд.

Keywords. Torque, brushless DC motor, mechanical characteristic, inertial stand.

Введение.

Бесщёточные двигатели постоянного тока (BLDC) находят широкое

применение в робототехнических приводах, системах управления беспилотными аппаратами, малых авиационных установках в качестве стартеров, а также в медицинской технике [1]. Одним из ключевых параметров их работы является крутящий момент, определяющий энергетическую эффективность и механическую характеристику привода. Знание механической характеристики двигателя позволяет добиться высоких показателей эффективности работы систем «рабочее колесо + электродвигатель», что делает задачу корректного измерения крутящего момента особо важной для создания и оптимизации существующих высокоэффективных электромеханических систем.

Существующие методы измерения крутящего момента для BLDC двигателей нередко оказываются ограниченными для маломощных установок из-за высокой стоимости датчиков, сложности передачи измерительных сигналов с вращающегося вала, низкой точности в условиях вибраций, а также ограниченной применимости в учебных лабораториях. В связи с этим актуален поиск методов, позволяющих снизить стоимость испытательного оборудования при обеспечении приемлемой точности.

Целью исследования является анализ существующих методов измерения крутящего момента BLDC и выбор метода наиболее доступного и перспективного для исследований двигателей малой мощности.

Теоретические основы механической характеристики BLDC.

Механическая характеристика BLDC-двигателя описывается механическими и электрическими зависимостями. Крутящий момент формируется за счёт электромагнитного взаимодействия ротора с магнитным полем статора [2-5]. В идеализированном виде электромагнитный (развивающий) крутящий момент M_e пропорционален фазному току I_f :

$$M_e = k_\tau I_f, \quad k_\tau = \frac{60}{2\pi N_p} k_e, \quad (1)$$

где k_τ – постоянная момента, зависящая от конструкции двигателя; k_e – постоянная ЭДС; N_p – число пар полюсов двигателя.

Эта линейная модель предполагает отсутствие насыщения и индуктивных эффектов при умеренных токах. Удельная мощность двигателя при вращении:

$$P = M\omega. \quad (2)$$

На практике отношения между током и моментом могут искажаться. Как показано в литературе, при приближении к магнитному насыщению Статора кривая $M_b(I_f)$ перестаёт быть линейной и добавление тока даёт всё меньший прирост момента. Так в [6] описано падение постоянной момента, которое составило от 10 до 15% при высоких токах.

Коммутация и форма ЭДС тоже влияют на момент. В классической схеме с датчиками Холла ток подаётся попеременно в две фазы, что вызывает «пульсирующий» момент, его амплитуда меняется по синусоиде

между переключениями. Пульсация суммарного момента может достигать ~13% от максимального значения [7], что ухудшает стабильность вращения.

Учет температуры двигателя играет немаловажную роль в получении его характеристик, так удельное сопротивление обмоток растёт на ~0,39%/°C, а магнитная индукция магнитов уменьшается, для типичных NdFeB-магнитов снижение постоянной момента при нагреве до 80 °C достигает порядка 20–25% (~0,11%/°C). При экстремальном перегреве возможна размагничиваемость ротора [7-8].

Обзор методов измерения момента BLDC.

Существуют различные подходы к измерению крутящего момента электродвигателей. Прямые методы предполагают использование датчиков, измеряющих момент непосредственно на валу. Они обеспечивают высокую точность, однако отличаются сложностью конструкции и высокой стоимостью измерительного оборудования. Косвенные методы основаны на вычислении момента по электрическим параметрам двигателя. Такие методы экономичны и удобны, но уступают по точности прямым измерениям: на них влияют неизвестные потери и неточности определения параметров. Так, например, в [9] отмечается, что косвенный расчет по току и скорости дешевле, но его точность ограничена знанием КПД двигателя.

Прямые методы базируются на измерении деформации вала или муфты. Наиболее распространённый прямой метод измерения момента - тензометрический, схема его работы представлен на Рис.1. На рабочем элементе (вал или фланец) устанавливается мост из тензорезисторов. При скручивании вала мост возбуждается и выдает напряжение, пропорциональное моменту. Активная длина тензодатчика обычно 20–100 мм [10].

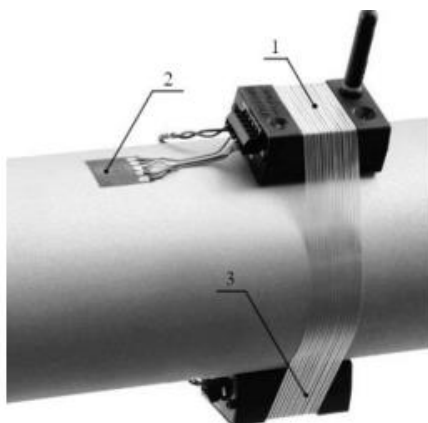


Рис.1 – Схема тензометрического метода измерения момента [10]

1 – корпус для микроконтроллера с АЦП и модуля радиопередачи;

2 – тензометрический датчик;

3 – источник питания-противовес

Классический тензометрический датчик обычно собран в мостовую схему с четырьмя датчиками, расположенными под углом 45° к оси вала, что позволяет компенсировать продольное смещение [10].

Тензометрические измерения обеспечивают высокую точность

(типичные погрешности доли процента при градуировке [11], однако требуют сложной установки и высокочувствительной дорогой электроники. Применение тензометрических датчиков ограничено невысокой частотой вращения контролируемого вала. Для систем, передающих значение крутящего момента при помощи скользящих контактов, характерно изнашивание контактов и, как следствие, ограниченный срок службы [10].

Магнитоупругие (магнитоэлектрические) датчики являются бесконтактным вариантом: они используют эффект изменения магнитного поля при скручивании торсиона. Магнитное кольцо, надетое на торсион, деформируется при нагрузке, и изменение магнитной проницаемости фиксируется обмоткой [12]. Такие сенсоры дают очень высокую точность и стабильность, поскольку не контактируют с валом и не влияют на динамику системы. Однако они могут быть чувствительны к температуре и внешним магнитным полям [13]. Схема магнитоупругого датчика представлена на Рис.2.

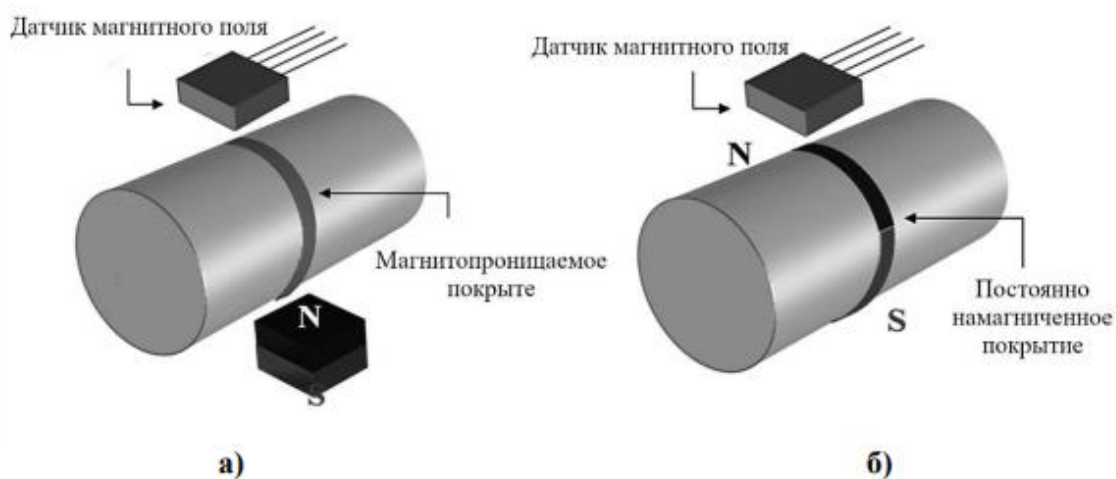


Рис.2 – Схема магнитоупругого метода измерения момента [10]
а – с внешним источником магнитного поля; б – с намагниченным покрытием на валу

Другой прямой подход – вал двигателя через муфту соединяется с нагружающим устройством (тормозом), момент которого изменяется в известных диапазонах. Такие динамометры обычно называют нагрузочными или реактивными. Существуют различные типы тормозов.

Гистерезисные тормоза дают постоянный момент независимо от скорости, вплоть до полной остановки ротора. Они контактные, но без трения (стальной ротор в магнитном поле), обеспечивают высокую повторяемость и долговечность [14]. Схема устройства гистерезисного тормоза представлена на Рис.3.

Гидравлические тормоза регулируют момент потоком жидкости через специальную камеру. Они хорошо подходят для двигателей средней мощности, но имеют сравнительно высокую инерционность и тепловую нагрузку на стенд.

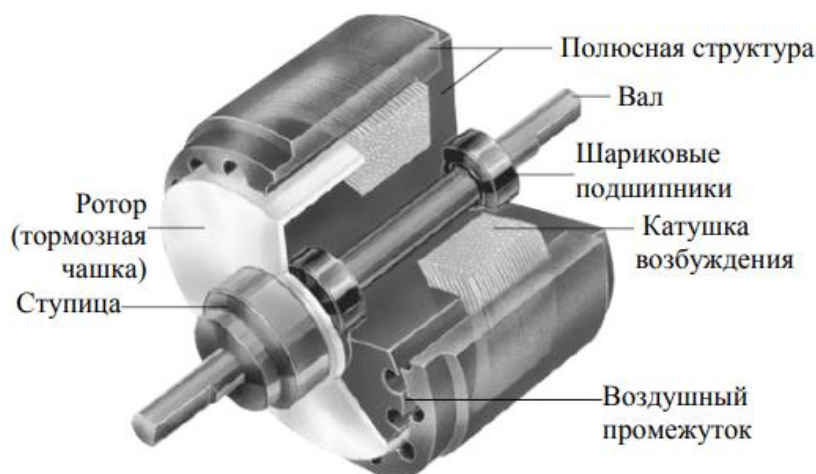


Рис.3 – Схема устройства гистерезисного тормоза [14]

Динамометрические генераторы (электрогенераторы) могут нагружать двигатель электрически, преобразуя мощность в сеть. Это эффективно с точки зрения отвода энергии, но требует сложного управления, поэтому на практике такие системы редки.

Наиболее интересны с точки зрения простоты получения характеристик -инерционные динамометры (динамические стенды с инерционной нагрузкой), которые представляют собой компромисс, они основаны на анализе разгона нагрузки и механического уравнения движения. Этот подход относительно прост в реализации и недорог по сравнению с другими методами. К недостаткам инерционных систем относятся требования к точному определению момента инерции и учету потерь на трение.

Для любого из методов прямого измерения крутящего момента большое внимание уделяется калибровке и методикам поверки. Стенды с динамометрами обычно комплектуются системой автоматической градуировки. Например, в лабораторных условиях при статической градуировке подаётся номинальное нагрузочное давление (для турбомашин) и снимают показания опорного силового датчика с погрешностью $\pm 0,25\%$ [11]. Динамическая градуировка проводится при холостой прокрутке и подаче нагрузки в прямом/обратном направлениях, а получаемые калибровочные коэффициенты позволяют снизить систематическую погрешность измерения момента до долей процента. Однако такие методы применимы лишь в полномасштабных испытательных комплексах.

Отдельно из косвенных методов оценки крутящего момента можно отметить систему на датчиках Холла, которые применяются не для прямого измерения момента, а для синхронизации электронных коммутаторов BLDC. Тем не менее, по результатам их работы (угловому положению ротора и сигналам ЭДС) можно косвенно судить о моменте, если известна электромеханическая модель двигателя. Однако этот подход теряет точность при сложном характере нагрузки, изменениях двигателя и в случае BLDC двигателей отсутствии возможности установки датчиков Холла на двигатели.

Рассмотрев точность различных методов измерения моментной

характеристики, делается вывод, что по критерию точности лидируют стационарные динамометры с или магнетоэлектрическими сенсорами: погрешность не превышает долей процента [11]. Тензометрические датчики на валу (вращающиеся) дают похожую точность, но требуют прецизионного монтажа и высокоточного питания мостов. Магнитоупругие (бесконтактные) датчики обеспечивают высокую надёжность и износоустойчивость, но стоят значительно дороже [13]. Косвенные методы (токовые/ЭДС-подходы) самые дешёвые и простые, но погрешности оцениваются в процентах; они подходят для грубых оценок и непрерывного мониторинга, но не могут заменить прямого измерения при высоких требованиях к точности. В таблице 1 приведено обобщённое сравнение методов измерения крутящего момента.

Концепция малогабаритного лабораторного стенда для измерения момента на основе инерциального метода.

Инерционный метод основан на накоплении кинетической энергии вращения маховика. Стенд включает в себя основные компоненты, схематично представленные на Рис.4.

Принцип работы предложенного инерционного стенда основан на уравнении

$$M = J\alpha - M_{\text{потерь}}, \quad (3)$$

где M – момент, создаваемый двигателем; J – приведённый момент инерции ротора и маховика; $\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t}$ – угловое ускорение маховика; $M_{\text{потерь}} = M_{\text{тр}} + M_{\text{ад}} + M_{\text{эл}}$ – потери на трение, аэродинамику и коммутацию.

Таблица 1 – Сравнение различных методов измерения момента

Метод измерения	Погрешность	Преимущества	Недостатки
Тензометрический	$\pm 0,2-0,5\%$ [11]	Высокая точность; малая нагрузка на систему	Сложная установка; требуется мостовой усилитель
Магнитоупругий	$\ll \pm 0,1\%$; [13]	Бесконтактность, высокая стабильность	Высокая стоимость; чувствителен к температуре и магнитным полям
Косвенные методы	$\pm 5-10\%$ [7]	Низкая стоимость, прост в исполнении	Зависит от характеристик двигателя, тока насыщения, температуры;
Динамометр (реактивный)	$\pm 0,2-0,5\%$	Очень высокая точность; надёжность	Громоздкий, стационарный стенд, дорогая установка
Инерционный динамометр	$\pm 5-10\%$	Средняя точность, Низкая стоимость, Универсальность	Невозможны длительные испытания при заданной нагрузке, требуется уточнение моментов потерь

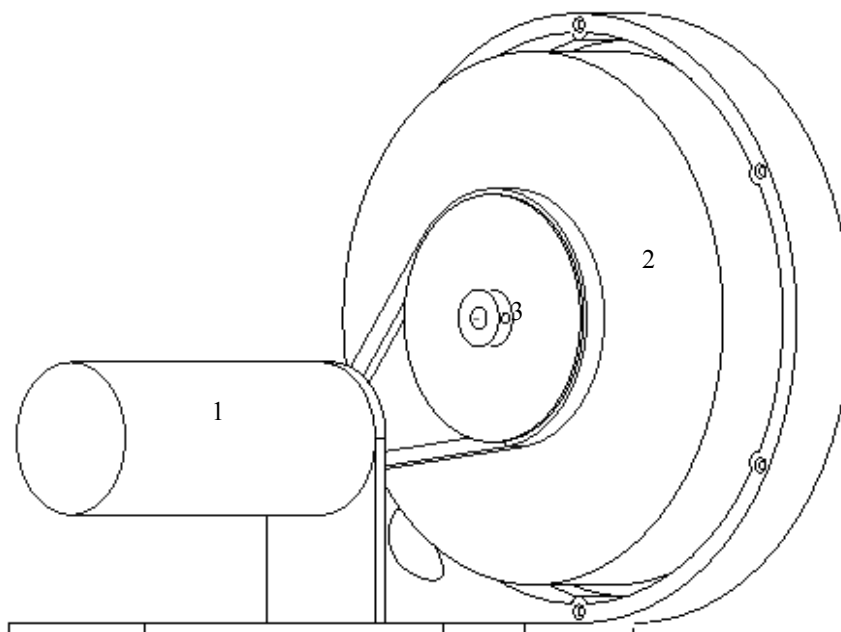


Рис.4 – Схема основных компонентов инерционного стенда измерения крутящего момента: 1 – BLDC-двигатель; 2 – маховик с известным моментом инерции; 3 – редукционная передача

При малых нагрузках вклад $M_{потерь}$ достигает 30-50 %, поэтому требуется тарировка стенда по данным холостого разгона.

На вал двигателя с помощью муфты крепится маховик известной инерции. При запуске двигателя контроллер разгоняет вал двигателя, который разгоняет маховик. Измеряя угловую скорость $\omega(t)$ ротора и зная момент инерции ротора и маховика, вычисляется момент, создаваемый двигателем. Также в эксперименте дополнительно измеряется ток двигателя, что должно позволить также получить характеристику КПД электродвигателя.

Схема испытаний.

Стенд содержит BLDC-двигатель, плату управления ESC, маховик с известной инерцией, оптический тахометр и измеритель силы тока. Сигналы тахометра и датчика тока поступают на микроконтроллер Arduino, который в реальном времени отслеживает число импульсов для вычисления скорости и ускорения. Накопленные данные позволяют построить зависимость момента от тока и частоты вращения.

Алгоритм измерений:

- 1) регистрация скорости $\omega(t)$ во времени;
- 2) численное дифференцирование $\rightarrow \alpha(t)$;
- 3) оценка момента по формуле (3);
- 4) вычитание откалиброванного $M_{потерь}$.

Ожидаемая погрешность.

Упрощённая конструкция стенда и использование доступной электроники ограничивают точность измерений. Анализ показывает, что на практике суммарная погрешность по крутящему моменту может достигать 5-10 %. Это связано с неточностью измерения времени (частота прерываний), шумами в цепи тока и потерями на трение, дисбалансом

маховика и дрейфом характеристик при нагреве. Для сравнения, в специализированных инерционных динамометрах при тщательной калибровке получают ошибки порядка 1-3 % [15], однако такой уровень достигается сложными методами фильтрации и компенсации. В рассматриваемом лабораторном стенде приемлемой точностью считается погрешность до 10 %.

Границы применимости метода: стенд пригоден для измерений в области средних и высоких токов, когда вращение устойчиво и ускорение явно выражено; трудности возникают при очень медленных вращениях, где погрешность в учёте потерь становится еще более значительной. Основные ограничения представлены в таблице 2.

Результаты.

Проведен сравнительный анализ подходов к измерению крутящего момента. Прямые сенсорные методы (тензодатчики на валу) обеспечивают высокую точность (порядка 0,1-1 %) при сложной установке и высокой стоимости оборудования. Косвенные методы по току просты и дешёвы, но их точность ограничена неизвестными потерями в приводе (типичная ошибка 5-15 %) [16]. Инерционные методы (испытательные стенды с маховиком или тормозом) занимают промежуточное положение: они относительно нетребовательны в конструкции и хорошо подходят для лабораторий, позволяя проводить динамические испытания двигателя без дорогостоящих датчиков. Также в таблице 3 приведены сравнительные характеристики методов.

Таблица 2 – Основные ограничения предлагаемого стенда

Максимальный момент	До 2 Н·м
Частота вращения	До 40 000 об/мин
Скорость разгона	Высокая

Таблица 3 – Сравнительная характеристика методов

Метод	Точность	Стоимость	Сложность реализации	Применимость для маломощных BLDC
Тензометрический/магнитоупругий	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Реактивный	Высокая	Средняя	Высокая	Средняя
Косвенный по току	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая
Инерционный	Средняя	Низкая	Низкая	Высокая

Практические возможности применения рассмотренных подходов: лабораторные стенды с инерционной нагрузкой позволяют получать и изучать динамические характеристики двигателей. Предложенный подход с Arduino-датчиками даёт достаточную точность для сравнительных и учебных целей и позволяет отказаться от дорогого оборудования.

Основные выявленные преимущества:

- отсутствие вращающихся датчиков;
- минимальная стоимость и простота электроники;
- учебная доступность.

Выявленные ограничения:

- значительное снижение точности при малых ускорениях;
- необходимость расчёта момента потерь;
- сниженная точность при высоких вибрациях.

Научная новизна и практическая значимость.

Главным научным вкладом работы является разработка концепции измерительного стенда для BLDC-двигателей, сочетающего инерционный метод и доступные электронные компоненты. Предложен алгоритм измерения крутящего момента при разгоне инерционной массы, реализованный на микроконтроллере Arduino. Практическая значимость заключается в том, что описанный стенд характеризуется простотой конструкции и низкой стоимостью при приемлемой точности измерений (погрешность порядка 5-10 %), что подтверждается литературными данными об эффективности подобных систем [15]. Применение такого стенда в лабораториях позволяет расширить возможности исследований в области электропривода без существенных затрат на оборудование.

Тем самым в статье предложен и аналитически обоснован инерционный метод измерения крутящего момента BLDC двигателей, позволяющий:

- создать аналог дорогостоящим тензометрическим системам;
- проводить испытания в учебных лабораториях;
- оценивать влияние алгоритмов управления;
- исследовать механические характеристики маломощных авиационных приводов.

Заключение.

В работе проведён анализ методов измерения крутящего момента в BLDC-двигателях малой мощности. Рассмотрены и проведены сравнения прямых (тензометрические, магнитоэлектрические) и косвенных (токовые) методов.

В статье показано, что инерционный измерительный стенд с использованием Arduino-датчиков эффективно реализует задачу определения крутящего момента BLDC-двигателя. Оценочная точность предложенного метода сопоставима с требованиями учебных и исследовательских стендов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на снижение погрешности за счёт улучшения аппаратных измерений (увеличение разрешающей способности АЦП, более точная синхронизация измерений) и разработки программных алгоритмов фильтрации.

Библиографический список.

1. Cham C.L. Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing / C.L. Cham, Z.B. Samad // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 9. – № 3. – P. 866-872. – DOI: 10.5370/JEET.2014.9.3.866.
2. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives / R. Krishnan. – Boca Raton, Florida, USA : CRC Press, 2017. – 611 p. – ISBN 1351837370.
3. Hanselman D.C. Brushless Permanent Magnet Motor Design / D.C. Hanselman. – Lebanon, Ohio, USA : Magna Physics Publishing, 2006. – 411 p. – ISBN: 1-881855-15-5.

4. Liu Z. et al. BLDC Motor Torque Estimation Based on Current Model // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Vol. 68, № 11. – P. 10875–10884.
5. Understanding BLDC (PMSM) electric motors: Base speed, no load speed and torque vs speed: Things in Motion Blog. – URL: <https://things-in-motion.blogspot.com> (дата обращения: 15.11.2025).
6. Montone D. Temperature Effects on Motor Performance. – URL: https://www.haydonkerkpitman.com/-/media/ametekhaydonkerk/downloads/white-papers/temperature_effects_on_dc_motor_performance.pdf (дата обращения: 15.11.2025). – Текст: электронный.
7. Physical Parameters Affecting Stall Torque of a Brushless DC Motor: Portescap Application Brief. – URL: <https://www.portescap.com/en/newsroom/whitepapers/2021/12/physical-parameters-affecting-stall-torque-of-a-brushless-dc-motor> (дата обращения: 15.11.2025).
8. Determining Stall Torque of BLDC Motor: Dewesoft Application Note. – URL: <https://dewesoft.com/blog/bldc-motor-stall-torque-testing> (дата обращения: 15.11.2025).
9. Шишов Е.С. Обзор типов датчиков для измерения крутящего момента в судовых энергетических установках / Е.С. Шишов // Транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 34. – № 4. – С. 33-41.
10. Григорьев В.А. Измерение крутящего момента при испытаниях авиационных ГТД: метод. указания к лаб. работе / В.А. Григорьев, Д.С. Калабухов, Я.А. Остапук [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та, 2016. – 24 с.
11. What are the Types of Torque Sensor?: ATO Business: Industrial Automation & Controls. – URL: <https://www.ato.com/types-of-torque-sensor> (дата обращения: 15.11.2025).
12. A comparison of magnetostrictive torque sensor technology and strain gauge: Melectric-Systems. – URL: <https://melectric-systems.de/2023/01/23/torque-measurement-in-agricultural-industry/> (дата обращения: 15.11.2025).
13. Гистерезисные динамометры: Технические данные MAGTROL. – URL: https://www.magtrol.ru/files/HD-ED/HD-ED-series_datasheet.pdf (дата обращения: 15.11.2025). – Текст: электронный.
14. Noval R. Performance Evaluation and Accuracy Analysis of a Chassis Dynamometer for Light Electric Vehicles / R. Noval, D.A. Sumarsono, M. Adhitya [et al.] // World Electric Vehicle Journal. – 2025. – Vol. 16. – № 3. – 17 p. – DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj16030170>.
15. How to measure torque?: Блог компании Dewesoft. – URL: <https://dewesoft.com/ru/blog/how-to-measure-torque> (дата обращения: 15.11.2025). – Текст: электронный.

¹Теткин Игорь Юрьевич, студент, i@tetkin.ru, Россия, Екатеринбург, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

²Рафиков Мурат Булатович, студент, murat.rafikov01@mail.ru, Россия, Екатеринбург, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

³*Калинин Илья Александрович, преподаватель, i.a.kalinin@urfu.ru, Россия, Екатеринбург, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

⁴*Марченко Юрий Глебович, преподаватель, iug.marchenko@urfu.ru, Россия, Екатеринбург, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»*

Tetkin Igor Yuryevich, student, i@tetkin.ru Russia, Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Rafikov Murat Bulatovich, student, murat.rafikov01@mail.ru, Russia, Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Kalinin Ilya Alexandrovich, Lecturer, i.a.kalinin@urfu.ru, Russia, Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Marchenko Yuri Glebovich, Lecturer, iug.marchenko@urfu.ru, Russia, Yekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №1(33) 2026 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 06.03.2026 . Заказ 3/2026 . Дата выхода в свет: . Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,95 .

Севастополь, 2026