

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№4(24)
2023

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, 2023

Главный редактор
Копп В.Я., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Заместитель главного редактора
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Ответственный секретарь
Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия
Варганов М.В., д.т.н., проф.
(г. Москва)
Греков Н.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Доронина Ю.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Жмудь В.А., д.т.н., проф.,
(г. Новосибирск)
Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Моисеев Д.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(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

- Карлов А.Г.** Процедуры и этапы поиска идей в процессе формирования концептуальных решений инновационных технологий и роботизированной техники в аграрно-промышленном секторе экономики **3**
- Миронов Д.Н., Варганов М.В.** Технологическое обеспечение качества при роботизированной обработке плоских поверхностей **19**
- Круговой А.Н.** Работа асинхронных электродвигателей на повышенных угловых скоростях **28**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Моисеев Д.В., Поляков А.А., Евстигнеев В.П., Воронин Д.Ю.** Способ построения гамильтонова цикла путем последовательного объединения вершин в подмножество **34**
- Бохонский А.И., Варминская Н.И.** Использование свойства равенства определенных интегралов с различными подынтегральными функциями **44**

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Васютенко А.П., Балакина Н.А.** Исследование статических характеристик пневматических преобразователей со сферической заслонкой **52**
- Николенко И.В., Мовчан С.И.** Компьютерное моделирование и исследование гидродинамических параметров движения частиц примесей водных растворов **61**
- Мирзоян Н.Ю., Заморёнов М.В., Гета Д.А.** Анализ влияния конструкции вихретокового преобразователя на выходные данные контроля при вихретоковом контроле **76**
- Поливцев В.П., Балакин А.И., Поливцев В.В., Гарматюк М.И.** Исследование режимов жидкостной вентиляции легких в нормобарии с использованием аппарата с замкнутым дыхательным циклом **85**
- Камцев В.А., Филипович О.В., Камцев Я.А., Еремин А.В.** Исследование вариативности быстродействия и точности работы интерфейса мозг-компьютер в зависимости от количества распознаваемых команд **102**

Подписной индекс сборника 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.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 658.512.2(075.8)

ПРОЦЕДУРЫ И ЭТАПЫ ПОИСКА ИДЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНИКИ В АГРАРНО-ПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Карлов А.Г.

Аннотация. Дан анализ особенностей применения процедур и этапы поиска идей в процессе формирования концептуальных инновационных решений. Приведены результаты анализа компетенций специалистов из опубликованного перечня ключевых компетенций цифровой экономики. Приведены прогнозы роста производительности труда на «цифровых» сельскохозяйственных предприятиях к 2024 году. Даны ссылки на примеры классификации инноваций - радикальные, улучшающие и модификационные. Даны примеры применения Теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), Общей теории сильного мышления (ОТСМ), Алгоритма исправления проблемных ситуаций (АИПС) в процессе поиска изобретательских решений в области АПК.

Ключевые слова. Роботизация; аграрно-промышленный сектор экономики; искусственный интеллект; прогнозирование; роботизированная техника и технология; инновация; систематизации инноваций; цифровое сельское хозяйство; Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ), Общая теория сильного мышления (ОТСМ), Алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС).

Проекты автоматизации и роботизации процессов в аграрном секторе экономики в настоящее время достаточно разнообразны и многочисленны.

Роботизацию сельского хозяйства можно разделить на два основных направления: это растениеводство, самое большое и обширное направление и животноводство, которое включает в себя птицеводство, свиноводство и крупный рогатый скот, в основном это молочное производство.

Важнейшим вектором развития современной экономической политики всех отраслей экономики, включая и АПК, должен стать переход на цифровые технологии. Министерством сельского хозяйства и продовольствия РФ была разработана программа «Цифровое сельское хозяйство», рассчитанная сроком на 6 лет – до 2024 г., предусматривающая

масштабирование следующих комплексных цифровых агрорешений для предприятий АПК: умная ферма; умное стадо; умная теплица; умный склад; умная переработка; умный агроофис; умное поле [1].

Цифровое сельское хозяйство – это сельское хозяйство, основанное на комплексной автоматизации и роботизации производства, использовании автоматизированных систем принятия решений, современных технологиях моделирования и проектирования экосистем.

Цель проекта «Цифровое сельское хозяйство»: цифровая трансформация сельского хозяйства посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений для обеспечения технологического прорыва в АПК и достижения роста производительности труда на «цифровых» сельскохозяйственных предприятиях в 2 раза к 2024 году

Однако в программе «Цифровое сельское хозяйство» нет выделенного направления развития технологий поиска и формирования концептуальных решений инновационных устройств, систем и технологий, построенных на современных алгоритмах и программных продуктах, которые базируются, например, на ТРИЗ-ОТСМ технологиях создания базовых концептов.

Любой инновационный проект как в области АПК, так и в других отраслях промышленности, начинается с поиска базовой концептуальной идеи. Если найденная авторами проекта идея существенно отличается от её аналогов, то только тогда имеет смысл получить патент на устройство или способ, а уже затем заинтересовать потенциальных инвесторов вложить финансы в создание и производство перспективного изделия или технологии. И только тогда можно с уверенностью утверждать, что проект носит инновационный характер.

Инновации принято подразделять на радикальные, улучшающие и модификационные инновации. Так, например, в работе [2] дан пример систематизации инноваций в упаковке молочной продукции в создании платформы сопровождения производства продуктов питания (таблица 1).

Таблица 1. – Систематизация инноваций в упаковке молочной продукции

Типы	Направления
Радикальные инновации	Наноупаковка молочной продукции. Инновационные упаковки нового поколения (с датчиками и сенсорами, с анимацией). Экологически безопасные виды упаковок нового поколения, в том числе «съедобные» упаковки. Асептическая упаковка молочной продукции.

Улучшающие инновации	Новые биоразлагаемые материалы для упаковки. Инновационные атмосферы и среды для упаковки. Инновации, нацеленные на улучшение внешнего вида продукта в упаковке. Технологии MAP-упаковки (в модифицированной атмосфере) без вакуумирования
Модификационные инновации	Инновации в упаковочных материалах, регулирующих температуру разогрева продукта. Новые упаковочные барьерные материалы для упаковки охлажденных и замороженных молочных продуктов. Новые упаковочные пленки. «Многokrатно закрывающиеся» упаковки. Инновации в упаковочных материалах, нацеленные на удобство потребителя. Технологии MAP-упаковки.

Целью настоящего исследования является выявление и анализ особенностей, процедур и этапов поиска идей в процессе формирования концептуальных решений инновационных технологий и роботизированной техники в аграрном секторе экономики.

Указанная цель исследования предполагает необходимость учёта компетенции специалистов из опубликованного перечня ключевых компетенций цифровой экономики (ККЦЭ) [3].

К этим компетенциям относят следующие.

Саморазвитие в условиях неопределенности: знать как и уметь ставить себе образовательные цели под возникающие жизненные задачи, подбирать способы решения и средства развития (в том числе с использованием цифровых средств) других необходимых компетенций.

Креативное мышление: знать, как развивать способности человека, генерировать новые идеи для решения задач цифровой экономики, уметь абстрагироваться от стандартных моделей: перестраивать сложившиеся способы решения задач, выдвигать альтернативные варианты действий с целью выработки новых оптимальных алгоритмов.

Критическое мышление в цифровой среде: знать как и уметь проводить оценку информации, ее достоверность, строить логические умозаключения на основании поступающих информации и данных.

Остановимся более подробно на особенностях формирования такой компетенции как «Креативное мышление». Она предполагает развивать способности человека генерировать новые идеи для решения задач цифровой экономики, уметь абстрагироваться от стандартных моделей: перестраивать сложившиеся способы решения задач.

Реализация на практике процессов формирования такой компетенции требует обобщения мирового опыта подготовки студентов, аспирантов, конструкторов и технологов компаний-лидеров, которые ставят своей задачей стать профессиональными «решателями неразрешимых проблем» междисциплинарного характера.

Обзор инновационных технологий и роботизированной техники в аграрно-промышленном секторе экономики.

Как в нашей стране, так и за её пределами людям не требуются разъяснения по тому факту, что сельскохозяйственное производство направлено на обеспечение населения продуктами питания и получение сырья для последующей переработки отраслями промышленности.

Повысить рентабельность сельскохозяйственного производства возможно лишь за счет внедрения передовых технологий, например точного земледелия. В настоящее время на помощь спешат роботы, которые способны самостоятельно выполнять трудоемкие сельскохозяйственные операции. Перспективность развития данного направления на постсоветском пространстве можно объяснить существующими кадровыми проблемами на селе, недостаточной популяризацией сельского хозяйства как важного и модного вида деятельности, развиваемого в настоящее время последними достижениями науки и техники, такими как роботы, беспилотные летательные аппараты и подобная наземная техника.

Вот некоторые образцы подобных инновационных роботов. **Робот Angus** осуществляет уход за культурами, выращиваемыми способом гидропоники [4]. Робот движется вдоль лотков с растениями, наблюдая за состоянием их развития, а также может выполнять их пересадку. При необходимости он перемещает лотки массой около 450 кг в зону обследования. Также робот осуществляет подкормку растений питательными элементами.



Рис.1 – Робот Angus

Робот E-Series от испанской компании **Agrobot** является высокопроизводительным автономным сборщиком клубники, который содержит 24 роботизированных манипулятора управляемыми по беспроводной связи.

Манипуляторы определяют спелость плодов клубники и собирают их бесконтактным способом. Специальные приспособления захватывают и подрезают стебель и помещают собранный урожай в контейнеры с целью дальнейшей упаковки [4].



Рис.2 – Робот E-Series – автономный сборщик клубники

Робот Earth Rover является разработкой британской компании. Робот использует оптическое изображение и 3D камеру для мониторинга урожая, выявляет растения с болезнями и определяет точные сроки уборки урожая. Также робот может находить сорняки и осуществлять точечное внесение пестицидов.



Рис.3 – Робот Earth Rover

Роботизация сельскохозяйственного производства является уже вполне осязаемым процессом развития данной отрасли. Пройдет еще

совсем немного времени – на смену управляемым операторами техническим средствам придут высокоточные и дисциплинированные машины, которые безукоризненно будут выполнять свои рабочие функции.



Рис.4 – TORUM беспилотный зерноуборочный комбайн Ростсельмаша

Беспилотный комбайн TORUM является инновационной разработкой в рамках проекта «Умное земледелие». Проект направлен на массовое использование беспилотных технологий и высокоточной навигации в сельском хозяйстве. Новый беспилотный зерноуборочный комбайн TORUM оснащен системами автоматизации техпроцесса, бережно обмолачивает зерно. Комплекс интеллектуальных систем управления комбайном снижает нагрузку на оператора. Функции машинного зрения обеспечивают новый уровень безопасности при уборке урожая.

Беспилотный комбайн TORUM оснащен значительным количеством умных систем. Например, система RSM Router, которая помогает выстроить наиболее эффективную схему-маршрут передвижения транспортных средств в поле. Это позволяет производить в срок уборку без потерь и повышает производительность на 15-20%. О других важных умных системах комбайна TORUM можно узнать в публикации [5] и других источниках информации.

Анализ и обоснование применения алгоритмов эффективного поиска идей в процессе формирования концептуальных решений инновационных устройств и технологии в аграрно-промышленном секторе экономики.

Реализовывать поиск инновационных решений в любой области деятельности человека можно различными путями, используя относительно простые приемы и процедуры. Или искать комплексные решения, используя значительные людские ресурсы, применяя трудоёмкие сложные методики, которые не приносят обычно быстрый позитивный результат.

При этом желательно учитывать известный факт, что ни один из альтернативных методов решения технических задач — мозговой штурм, синектика, метод фокальных объектов и так далее — не завоевал в мире такой популярности, как ТРИЗ.

Сегодня мировой рынок услуг только по обучению ТРИЗ оценивается в сотни миллионов долларов. Россия вполне может занять значительную долю этого рынка — сильные «trizовские» школы сохранились в Москве и Санкт-Петербурге. Особенно перспективны уникальные ниши, в которых пока никто не может составить конкуренцию российской тризовской школе. Речь идет о повышении квалификации для руководителей тризовских отделов корпораций и подготовке тризовцев — консультантов по решению задач в компаниях. Это относительно новая профессия, суть которой — помогать новообученным инженерам компаний самим решать технические проблемы своей корпорации.

В Internet имеется несколько сотен сайтов и более миллиона ссылок посвященных ТРИЗ. Создана и успешно работает Международная Ассоциация ТРИЗ (МА ТРИЗ в Петрозаводске и С.Петербурге), президентом которой до последнего дня своей жизни являлся Генрих Альтшуллер. Сейчас Международной Ассоциацией ТРИЗ руководят его ученики.

Эволюция базы знаний технологий ТРИЗ-ОТСМ (Теория Решения Изобретательских Задач – Общая Теория Изобретательских Задач) происходит постоянно. Кратко об этом сказать невозможно. Однако можно эти процессы обобщить, например информацией, представленной на **Рис.5**. Здесь отражены кратко инструменты и методы инновационного проектирования, привычные для специалистов-тризовцев [6].

До появления ТРИЗ все изобретатели работали «Методом проб и ошибок» (МПиО). Используя традиционные МПиО для решения изобретательских задач, разработчики часто оказываются под давлением психологической инерции, что не позволяет сократить многочисленные пробы и ошибки, приходится тратить время на значительное количество переборов вариантов, что чаще всего не приводит изобретателя к получению эффективного решения.

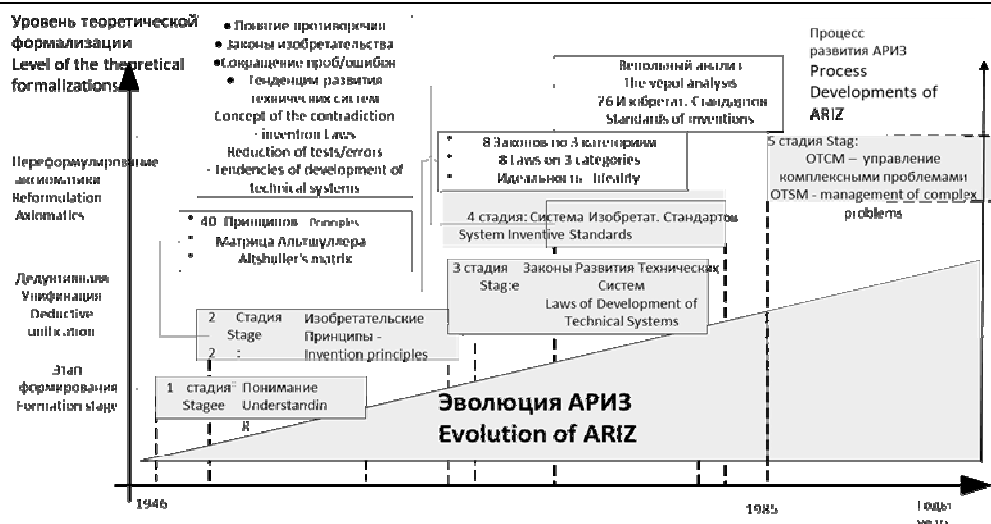


Рис.5 – Инструменты и методы инновационного проектирования: эволюция базы знаний технологий ТРИЗ-ОТСМ

Все изобретательские проблемы можно условно разбить на 2 группы: с известным решением и неизвестным. Известные решения обычно можно найти информационным поиском в книгах, журналах или спросив экспертов по данному вопросу (работа по аналогиям и т.п.).

Другая группа это изобретательские проблемы, требующие нестандартного подхода к решению. Почему трудны задачи второй группы: они могут иметь разный уровень решения; подвержены психологической инерции; содержат одно или несколько противоречий.

Начинающие изобретатели не обладают достаточным опытом, чтобы самостоятельно и в короткий срок разрешить изобретательскую ситуацию. Поэтому они часто действуют интуитивно, в лучшем случае используя простейшие приемы изобретательства.

К ним обычно относят: аналогию, инверсию, эмпатию, фантазию.

Эти приемы обычно не относят к инструментам ТРИЗ, они ближе к МПиО. Однако в комбинации с относительно простыми и эффективными инструментами классической ТРИЗ, указанные здесь простейшие приемы изобретательства в ряде случаев дают возможность решить относительно простые изобретательские задачи.

Ниже приведены некоторые интересные нетривиальные решения, которые достаточно быстро и эффективно позволили автоматизировать процессы переработки продукции в аграрно-промышленном секторе экономики.

На одном из консервных заводов Советского Союза в 50-е годы возникла такая проблема. Семена и плодоножки сладких перцев удаляют

вручную из-за сложной формы и разных размеров плодов. Конструкторам и технологам предприятия была поставлена задача. Возросший резко в те годы спрос на консервированную продукцию овощеводства требовал многократно увеличить производительность труда на этом предприятии. Нужно обработать 5-10 тонн перца в день. Машина, подобная рукам человека (робот-манипулятор первого поколения) не выдержало и 2-х часов.

Изобретатели завода применили идею из перечня изобретательских приемов ТРИЗ - «Пневматика и гидравлика» [6].

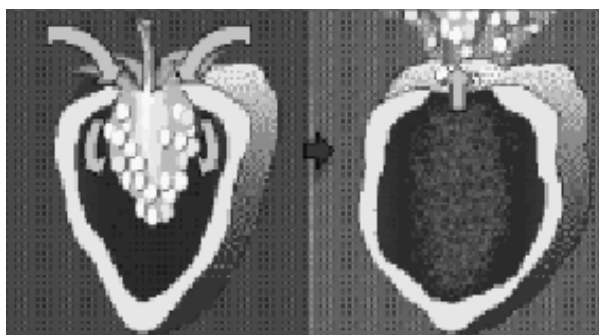


Рис.6 – Решение: а - медленная подача сжатого воздуха внутрь перца, б – быстрый сброс давления посредством клапана быстрого выхлопа

Суть изобретательской идеи (Рис.6). Поместить перцы в герметичный контейнер и медленно поднимать давление воздуха. Давление снаружи и внутри перца выровняется. После этого резко сбросить внешнее давление. В результате внутреннее давление в каждом перце выбросит плодоножки и семена из перца наружу.

Еще один характерный пример нестандартного подхода к процессу автоматизации на предприятии аграрно-промышленного комплекса. Проблема возникла на предприятии по производству подсолнечного масла. Как быстро почистить семечки подсолнечника? Суть изобретательской идеи (Рис.7). Семечки потоком воздуха пропускаются через сопло Лавалья, поднимающее давление. На выходе семечки сами раскрываются, аналогично, за счет избыточного давления воздуха внутри каждой семечки [6].

Г.С. Альтшуллер ввел в ТРИЗ понятие: «Идеальное Решение проблемы». Все системы имеют тенденцию совершенствоваться в направлении идеальности. Идеальность определяется как отношение полезных и вредных функций системы:

Идеальность = Сумма полезных функций/Сумма вредных функций $\rightarrow \infty$

Функция – это действие или процесс. Полезные Функции включают в себя все полезные результаты действий системы. Вредные Функции включают в себя все факторы "расплаты" за существование системы: цену, занимаемое пространство, производимый шум, потребляемую энергию, необходимые для производства ресурсы и прочее.

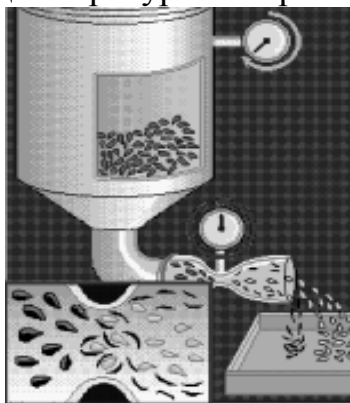


Рис.7 – Проблема - очистка семечек от кожуры.

Решение: изобретательский прием ТРИЗ - «Пневматика и гидравлика»

Отсюда вывод. Идеальным следует считать такое устройство, действие или процесс, функции которого полностью выполняются, а габариты, масса, потребление энергии, цена, необходимые для производства ресурса стремятся к нулю!

Развитие ТРИЗ, которое происходит и в настоящее время, убедительно показывает инструменты, с помощью которых решают проблемы, могут быть применимы не только в технике, но и в самых различных областях знаний, если их определенным образом преобразовать.

В процессе эволюции ТРИЗ возникла ОТСМ — «Общая теория сильного мышления». Все проблемы похожи друг на друга. В любой серьезной проблеме есть противоречие, разрешая его, мы всегда опираемся на объективные законы и используем ресурсы системы. Есть общие закономерности развития систем, правила построения и разрешения противоречий.

Согласно подходу ОТСМ алгоритмы решения задачи («технологии» в терминологии ОТСМ) применяются по нарастающей сложности и эффективности. Это проиллюстрировано так называемой «пирамидой Хоменко» [7]. (**Рис.8**).

Наиболее простая из ОТСМ-ТРИЗ-технологий является технология «Типовое решение». В ней полная оптимизация и процесс принятия решений хорошо формализованы. ОТСМ-ТРИЗ решение проблемы может быть описано с использованием типовых элементов и сравнений.

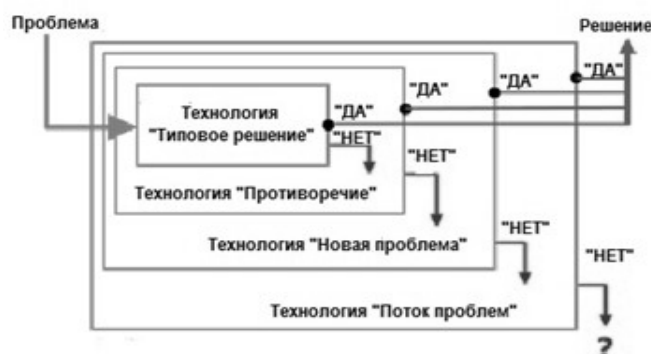


Рис.8 – Пирамида Хоменко

Технологии «Противоречие», «Новая проблема», «Поток проблем» предназначены для выстраивания финального решения из частичных концептуальных решений. Оценки этих решений и развитие сети проблем производится решателями на основе новой информации, полученной в процессе работы над проблемной ситуацией и итеративных процессов построения решения.

При возникновении случая «нетиповое решение» изобретатели реализуют процедуры изменения набора технических альтернатив и структуры системы, расширяя знание междисциплинарного характера.

Применяя этот метод, мы имеем дело с ситуацией инновации. ОТСМ-ТРИЗ рекомендует осуществить этот подход управления процессом для того, чтобы учесть технические альтернативы и приспособить структуру системы к условиям «нетипового решения» [6,7].

ОТСМ-ТРИЗ рекомендует, учитывая предпочтения, определить идеальность и представить начальную проблему через систему противоречий, которые позволят строить соответствующие новые техническую альтернативу и структуру системы.

На базе применения ОТСМ-ТРИЗ-технологий для решения проблем, АИПС (Алгоритма исправления проблемных ситуаций) разработан и успешно используется современный и эффективный софт Solving Mill. Этот программный продукт разработан авторами на русском языке, но имеются и применяются версии на английском и китайском [6,9].

Степень участия заказчика, решателя и специалиста на разных этапах применения алгоритма АИПС-2015 наглядно представлена на Рис.9. Одно из предназначений данного алгоритма – это организация такой работы команды, которая пробуждает активность в каждом участнике проекта. Следование логике алгоритма подталкивает к получению правильного ответа. И неважно, у кого первого созрела идея решения, всё равно это

результат работы команды. Именно в сотрудничестве рождаются наиболее эффективные идеи.

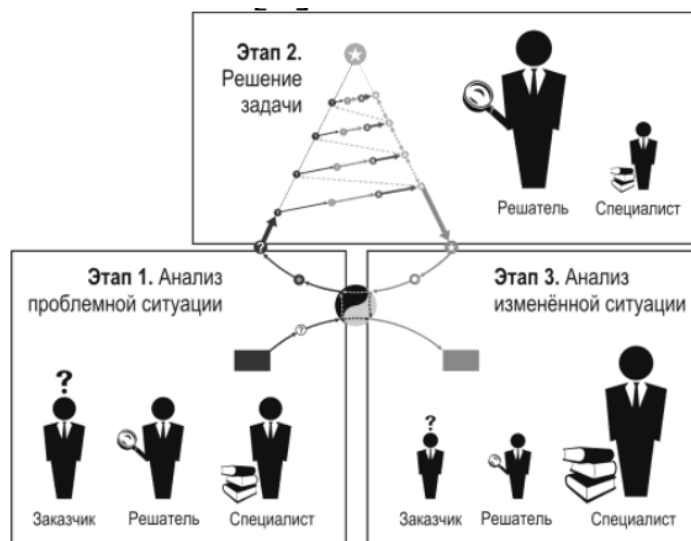


Рис.9 – Степень участия заказчика, решателя и специалиста на разных этапах алгоритма

Авторский коллектив, который разработал и применяет АИПС и софт Solving Mill, возглавлял представитель Минской школы ТРИЗ, Мастер ТРИЗ, к.т.н. Шпаковский Николай Андреевич [6,10,11]. Софт был многократно апробирован при решении проблем множества реальных производственных компаний. Среди них Samsung Electronics, Posco (Республика Корея) и другие.

Хотим обратить внимание на характерные факты, касающиеся применения и степени эффективности ТРИЗ-ОТСМ технологий проектирования в Samsung Electronics. В 2000 году Мастера ТРИЗ из Минска Хоменко Н.Н. и Шпаковский Н.А. были приглашены на работу в эту компанию для обучения инженерных кадров и помощи в решении актуальных научно-технических проблем корпорации. Они были первыми русскоязычными специалистами, которых руководство компании пригласило на работу в Республику Корея.

В Самсунг вместе с этими экспертами позже работали много тризовцев из Санкт-Петербурга, Минска и других городов России и Белоруссии. Они решали задачи, учили и поддерживали корейских специалистов. Была проделана огромная работа именно по организации системного изобретательства. Это уже не соревнование нескольких «тризовцев» и «нетризовцев», здесь уже можно говорить о статистике. Специалисты из «Изобретающей Машины» определили динамику патентования специалистами Самсунга. Если ТРИЗ эффективна, то можно

было наблюдать рост количества патентов, получаемых в год. Если ТРИЗ неэффективна, то никакого роста не будет, скорее можно говорить о снижении.

Взяли статистику, глянули, изумились.

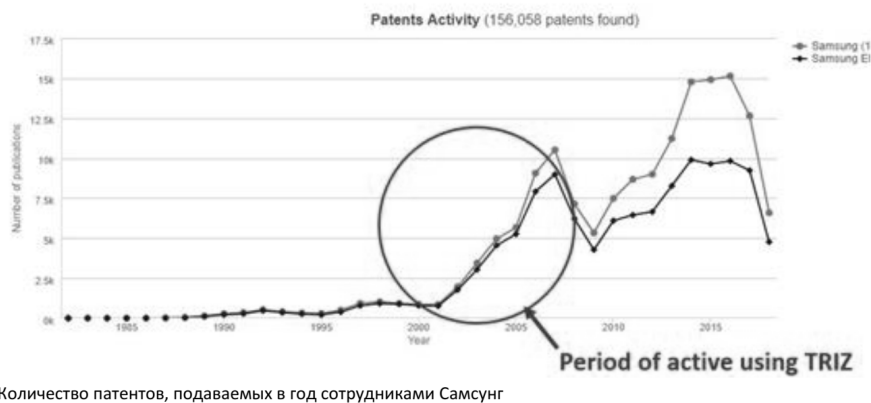


Рис.10 – График изменения количества патентов в год, подаваемых сотрудниками Самсунга в период активного работа специалистов ТРИЗ с 2000 по 2007 годы

Начиная с 2000 года и по 2007 год, когда коллектив «тризовцев» активно работал в Корее, произошёл резкий подъем патентования. За эти семь лет количество патентов, получаемых Самсунг, выросло в 14 раз! Конечно, решали изобретательские задачи, выполняли проекты и готовили патенты специалисты Самсунга – честь им и хвала. Но методики на основе ТРИЗ были тем инструментом, который позволял это делать эффективно. Да и сами «тризовцы» были не последними в этом грандиозном рывке [10].

Выводы.

1. Приведенные в данной статье факты показывают, что для повышения эффективности процесса поиска идей, которые могут стать концептами инновационных технологий и роботизированной техники в аграрно-промышленном секторе экономики целесообразно обратиться к опыту применения ОТСМ-ТРИЗ в других сферах творческой деятельности инженерных и научных кадров.
2. Считаю целесообразным и рекомендую применять русскоязычный софт Solving Mill, который разработан на теоретической основе технологий ОТСМ-ТРИЗ и на методической основе АИПС-2015. Он доступен в режиме аккаунта и имеет конкурентно приемлемую цену за его использование как промышленными предприятиями, так и учебными заведениями.

Библиографический список

- 1 Романова Л.В. Развитие агропромышленного комплекса в условиях цифровой экономики / Л.В. Романова, И.Г. Шашкова // Фундаментальные исследования. – 2020. – №11. – С. 152-156.
- 2 Сайт Трансформация сельского хозяйства: цифровые возможности развития. [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.secuteck.ru/articles/transformaciya-selskogo-hozyajstva-cifrovye-vozmozhnosti-razvitiya>.
- 3 Сайт Список ключевых навыков для цифровой экономики и перечень ключевых навыков для цифровой экономики [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://profstandart-rosmintrud.ru/spisok-klyuchevyx-navykov-dlya-cifrovoj-ekonomiki-i-perechen-klyuchevyx-navykov-dlya-cifrovoj-ekonomiki/> | [profstandart.rosmintrud.ru](https://profstandart-rosmintrud.ru).
- 4 Сайт Роботы – будущее сельскохозяйственного производства [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://glavpahar.ru/articles/roboty-budushchee-selskohozyaystvennogo-proizvodstva#>
- 5 Сайт Ростсельмаш продемонстрировал в уборке беспилотный комбайн [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://glavpahar.ru/news/rostselmash-prodemonstriroval-v-uborke-bespilotnyy-kombayn>.
- 6 Карлов А.Г. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие / А.Г. Карлов, Н.А. Шпаковский – М.: Центр каталог, 2019. – 536 с.
- 7 Сайт N. Khomenko. «General Theory on Powerful Thinking (OTSM): Digest of Evolution, Theoretical Background, Tools for Practice and Some Domain of Application». Tokyo, 2010 [электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://jlproj.org>.
- 8 Сайт Хоменко Н.Н., Аштиани М. Классическая ТРИЗ и ОТСМ как теоретическая основа инструментов для решения нестандартных проблем [электрон. ресурс]. Режим доступа: http://www.jlproj.org/this_bibl/KNN_ETRIA.RUS11.pdf.
- 9 Карлов А.Г. Особенности алгоритмов решения изобретательских задач и софта для поддержки процессов проектирования средств автоматизации инструментами ОТСМ-ТРИЗ-технологий / А.Г. Карлов, Н.А. Шпаковский // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2018. – Том №4. – с. 3-17.
- 10 Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ. Подходы и практика применения. – М.: Инфра-М, 2018. – 348 с.
- 11 Дистанционный учебный курс «ТРИЗ-тренер». Автор Шпаковский Н.А. triztrainer.ru. Минск.2021.

Bibliograficheskiy spisok

1. Romanova L.V. Razvitie agropromyshlennogo kompleksa v usloviyah cifrovoj ekonomiki / L.V. Romanova, I.G. SHashkova // Fundamental'nye issledovaniya. – 2020. – №11. – S. 152-156.
2. Sajt Transformaciya sel'skogo hozyajstva: cifrovye vozmozhnosti razvitiya. [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.secuteck.ru/articles/transformaciya-selskogo-hozyajstva-cifrovye-vozmozhnosti-razvitiya>.
3. Sajt Spisok klyuchevyh navykov dlya cifrovoj ekonomiki i perechen' klyuchevyh navykov dlya cifrovoj ekonomiki [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://profstandart-rosmintrud.ru/spisok-klyuchevyx-navykov-dlya-cifrovoj-ekonomiki-i-perechen-klyuchevyx-navykov-dlya-cifrovoj-ekonomiki/> | [profstandart.rosmintrud.ru](https://profstandart-rosmintrud.ru).
4. Sajt Roboty — budushchee sel'skohozyajstvennogo proizvodstva [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://glavpahar.ru/articles/roboty-budushchee-selskohozyaystvennogo-proizvodstva#>
5. Sajt Rostsel'mash prodemonstriroval v uborke bespilotnyj kombajn [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://glavpahar.ru/news/rostselmash-prodemonstriroval-v-uborke-bespilotnyy-kombayn>.
6. Karlov A.G. Idei, izobreteniya, innovacii v sfere avtomatizacii tekhnologij i tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie / A.G. Karlov, N.A. SHpakovskij – M.: Centr katalog, 2019. – 536 s.
7. Sajt N. Khomenko. «General Theory on Powerful Thinking (OTSM): Digest of Evolution, Theoretical Background, Tools for Practice and Some Domain of Application». Tokyo, 2010 [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://jlproj.org>.
8. Sajt Homenko N.N., Ashtiani M. Klassicheskaya TRIZ i OTSM kak teoreticheskaya osnova instrumentov dlya resheniya nestandartnyh problem [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: http://www.jlproj.org/this_bibl/KNN_ETRIA.RUS11.pdf.
9. Karlov A.G. Osobennosti algoritmov resheniya izobretatel'skih zadach i softa dlya podderzhki processov proektirovaniya sredstv avtomatizacii instrumentami OTSM-TRIZ-tekhnologij / A.G. Karlov, N.A. SHpakovskij // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – 2018. – Tom №4. – s. 3-17.
10. SHpakovskij N.A. OTSM-TRIZ. Podhody i praktika primeneniya. – M.: Infra-M, 2018. – 348 s.
11. Distancionnyj uchebnyj kurs «TRIZ-trener». Avtor SHpakovskij N.A. triztrainer.ru. Minsk.2021.

*Карлов Антон Георгиевич, к.т.н., доцент, доцент,
antkar38cam@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

*PROCEDURES AND STAGES OF SEARCHING FOR IDEAS IN THE
PROCESS OF FORMING CONCEPTUAL SOLUTIONS FOR INNOVATIVE
TECHNOLOGIES AND ROBOTIC TECHNOLOGY IN THE AGRICULTURAL
AND INDUSTRIAL SECTOR OF THE ECONOMY*

A.G. Karlov

The analysis of the features of the application of procedures and the stages of the search for ideas in the process of forming conceptual innovative solutions is presented. The results of the analysis of the competencies of specialists from the published list of key competencies of the digital economy are presented. Forecasts of labor productivity growth at "digital" agricultural enterprises by 2024 are given. References are given to examples of classification of innovations - radical, improving and modifying. Examples of the application of the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) are given, The general theory of strong thinking (OTSM), the Algorithm for correcting problematic situations (AIPS) in the process of searching for inventive solutions in the field of agriculture.

Keywords: robotization; agricultural and industrial sector of the economy; artificial intelligence; forecasting; robotic equipment and technology; innovation; systematization of innovations; digital agriculture; Theory of inventive problem solving (TRIZ), The general theory of strong thinking (OTSM), an algorithm for correcting problem situations (AIPS).

*Karlov Anton Georgievich, candidate of technical science, docent, docent,
antkar38cam@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Миронов Д.Н.¹, Вартанов М.В.²

***Аннотация.** В статье анализируется технологическое обеспечение качества роботизированного полирования с применением технологии нейронных сетей.*

***Ключевые слова.** Роботизированное полирование; качество поверхности; нейронные сети; режимы резания; силомоментный датчик*

Введение

Технологическое обеспечение качества полирования является одним из определяющих факторов формирования эксплуатационных свойств деталей. Большое количество случайных факторов в технологической системе обработки обуславливает сложности в обеспечении стабильного качества. Полировальные и доводочные операции неизменно связаны с ручным трудом, что обусловлено спецификой данной операции, которая заключается в особой точности работы. Применение роботов с силомоментным датчиком взамен ручного труда в данной операции может повысить стабильность и качество обработки. Проблема технологического обеспечения качества может быть решена путем установления функциональной связи качества с параметрами полирования, для чего в данной работе применяется нейронная сеть. Нейронная сеть призвана прогнозировать съём материала и давать предполагаемую оценку качества поверхности, а силомоментный датчик выступает в роли органа чувств промышленного робота. Эффективность представленного подхода подтверждается экспериментально.

1. Обзор литературы, степень разработанности проблемы

Из-за высоких требований к качеству поверхностей таких деталей как лопатки турбин и винтов, деталей, работающих на трение, литейных форм, финишный процесс обработки постоянно усложняется и требует высокой точности. Кроме того, рабочим приходится трудиться в условиях повышенного шума и пыли, проводя за работой с одной деталью не один час. В сравнении с механизированной обработкой, ручной труд менее производительен.

Чтобы преодолеть вышеперечисленные трудности используются промышленные роботы. Роботы производительны при обработке труднодоступных мест детали, а также в обработке поверхностей со

сложной конфигурацией. Трудности в использовании заключаются в ограниченной рабочей зоне, низкой жесткости, лимитированной грузоподъемности. Промышленные роботы имеют преимущества перед станками, которые выражаются в большей гибкости, низкой стоимости, легкой переналадке. Важным моментом является то, что робот может быть оборудован большим количеством дополнительного оснащения для полирования.

Эти преимущества привлекают исследователей для разработки технологий роботизированного полирования. Для достижения высокой эффективности процесса полирования нужны алгоритмы генерации положения и траектории. Сила полирования напрямую влияет на съем материала и качество поверхности, поэтому для достижения требуемого результата большое количество исследований опирается на метод постоянного контроля силы [1,4,5].

Известно, что процесс полирования имеет сложную структуру, включая явления трения, царапания и резания. Съем материала и качество поверхности зависит от многих факторов: силы полирования, частоты вращения инструмента, подачи и величины абразивного зерна. Исследователи создали несколько предиктивных моделей для процесса полирования, которые могут быть классифицированы как модели, основанные на теории резания, экспериментальных исследованиях и их анализе, планировании экспериментов, расчетных методах. Технологии искусственного интеллекта, такие как нейронные сети, хорошо известны за способность аппроксимации и применяются для прогнозирования качества поверхности не только при полировании, так как адекватно описывают сложные процессы [2,3,6,7].

Множество факторов в процессе полирования влияет на результат: неравномерное распределение припуска по плоскости, неоднородность свойств поверхности, различные внешние факторы в процессе полирования. Для учета этих факторов рабочий использует накопленный опыт, например, нивелирует криволинейность поверхности различной силой нажима. Нейронная сеть призвана аккумулировать опыт и результаты полирования, чтобы их основе построить модель процесса полирования и установить рекомендуемые параметры процесса полирования для достижения требуемой шероховатости.

Предметом изучения является оптимизация параметров автоматизированной обработки для обеспечения технологического качества обработки плоских поверхностей с требуемым съемом материала при минимальном количестве проходов. Чтобы установить зависимость

между параметрами полирования и производительностью полирования создается и применяется нейронная сеть.

2. Обеспечение качества поверхности

Геометрия реальной поверхности в значительной степени отличается от идеальной. На ней имеются макро- и микронеровности различной величины, которые влияют на эксплуатационные свойства деталей. Оценка неровностей производится различными методами, базирующимися на условном делении неровностей поверхности на макроотклонения, волнистость, шероховатость и субшероховатость. Основным критерием качества полирования является шероховатость поверхности. Под шероховатостью поверхности понимается совокупность микронеровностей высотой 10^{-2} - 10^2 мкм с шагом меньшим базовой длины. Операция классического полирования направлена на снижение шероховатости поверхности без устранения отклонений формы деталей, однако при роботизированной обработке с применением адаптивных алгоритмов управления процессом полирования можно говорить о исправлении погрешностей формы детали.

При абразивной обработке на точность размеров и формы деталей влияют точность станка, жесткость технологической системы, глубина резания и время выхаживания; на волнистость - жесткость технологической системы, точность станка, время выхаживания; на параметры шероховатости - зернистость круга, подача и время выхаживания; на физико- механические свойства - СОТС, твердость круга и глубина резания.

Для технологического обеспечения качества к роботу предъявляются требования по повторяемости движений, а также точности позиционирования. Для повышения качества обработки и стабильности важно иметь систему контроля и обратной связи, в нашем случае на основе силомоментного датчика, которая позволит контролировать процесс полирования и вносить корректировки в траекторию движения. Необходимо специальное программное обеспечение и алгоритмы управления роботом для реализации операции. Важно правильно подобрать инструмент под определенные задачи, учитывая параметры процесса полирования, материал и вид обработки. Качество поверхности также зависит от оптимальных параметров полирования, таких как сила, скорость, время, глубина резания.

3. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Экспериментальная установка состоит из промышленного робота ABB IRB 140 с полировальным шпинделем. Робот оснащен шестиосевым

датчиком сил и моментов, полировальным инструментом с диаметром рабочей части 15 мм и шпинделем переменного тока с максимальной частотой вращения 24000 об/мин.

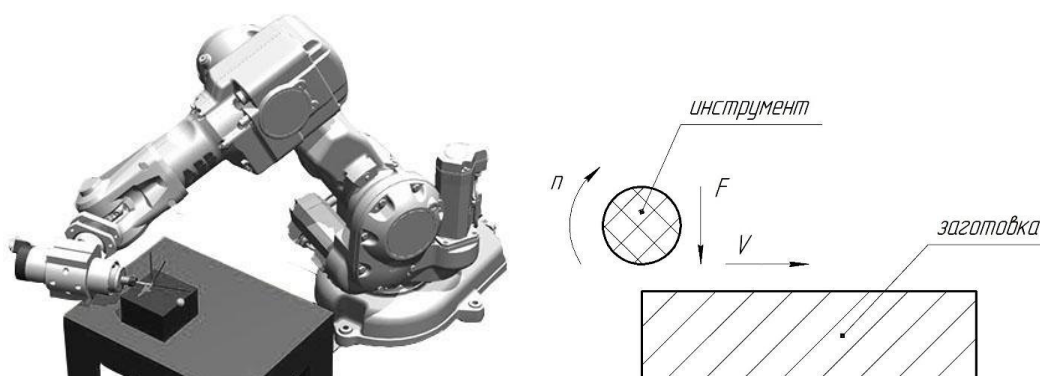


Рис.1 – Экспериментальная установка и схема обработки

Для проведения экспериментов используется заготовка из материала АК6 ГОСТ 4784-19. При обработке заготовки варьируются следующие параметры: сила; частота вращения инструмента; подача. В качестве выходного параметра принята шероховатость. Шероховатость поверхности измеряется пять раз для снижения статистической погрешности до и после прохода. Для измерения шероховатости используется профилометр. Повышение качества определяется снижением начальной величины шероховатости.

Методология и методы исследования

Целью создания алгоритма является установление взаимосвязей между параметрами процесса полирования и качеством поверхности. С помощью нейронной сети моделируется процесс полирования для того, чтобы на основе этой модели выбирать режимы полирования, которые позволят достичь требуемого качества поверхности. Этапы построения и верификации нейронной сети таковы (**Рис.2**):

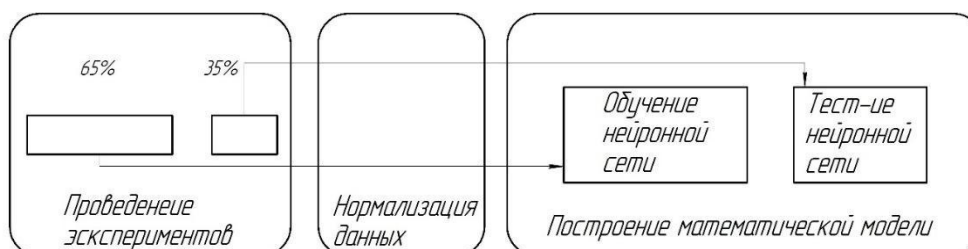


Рис.2 – Этапы моделирования процесса полирования

– проведение экспериментов с различными параметрами полирования для формирования базы данных для нейронной сети;

- измерение и расчет шероховатости;
- нормализация всех параметров для эффективного обучения модели;
- использование результатов экспериментов для обучения нейронной сети и создания модели процесса полирования;
- проверка модели на тестовой выборке для оценки ее точности;
- сохранение весов функции и модели при удовлетворительной ошибке между фактическими и прогнозируемыми величинами шероховатости.

4. Создание нейронной сети и проведение экспериментов

Для установления влияния параметров процесса полирования на производительность использовалась технология нейронных сетей. Созданная нейронная сеть имеет входной слой, 2 скрытых слоя с 5 и 7 нейронами соответственно, в качестве функции активации на которых применяется ReLu и выходной слой. Входные нейроны во входном слое это сила резания, скорость вращения инструмента и подача. Выходной слой сети— это шероховатость. Для обучения сети применялся алгоритм обратного распространения ошибки.

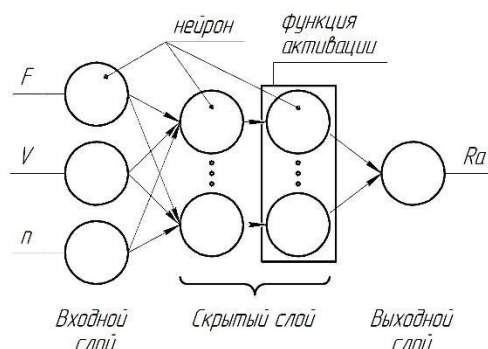


Рис.3 – Структура нейронной сети

Общая выборка данных поделена на тренировочные данные, которым отдано шестьдесят пять процентов и на тестовые, составляющие остальные тридцать пять процентов. Общее количество проведенных экспериментов для обучения и тренировки нейронной сети равнялось двадцати пяти. В данной статье рассматривается влияние трёх факторов на выходной параметр - качество поверхности. Чтобы ускорить обучение и снизить шанс застрять в локальном минимуме данные, подающиеся на вход нейронной сети, должны быть нормализованы. В качестве метода нормализации применялась стандартизированная оценка или z-оценка — это мера относительного разброса, наблюдаемого или измеренного значения, которая показывает, сколько стандартных отклонений

составляет его разброс относительного среднего значения. Это безразмерный статистический показатель, используемый для сравнения значений разной размерности или шкалы измерений:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

где Z – стандартизированная оценка, x – наблюдаемое значение, μ – среднее значение в выборке, σ – стандартное отклонение выборки

Для создания нейронной сети применяется среда Python, библиотека для машинного обучения TensorFlow и высокоуровневый API Keras для глубокого обучения и работой с нейронными сетями. В процессе обучения, вводимая информация, составляющая входной слой, соотносятся с данными в выходном слое для установления зависимости и построения модели. Обучение останавливается, когда среднеквадратичная ошибка меньше чем целевая или при достижении установленного порога эпох обучения (**Рис.4**):

- чтобы верифицировать созданную сеть проверяем ее тестовым набором примеров из подготовленного датасета, также нормализуя эти значения. Следует отметить, что тестовые примеры не используются при обучении сети;

- выходные данные тестовых образцов, полученные с помощью нейронной сети, сравниваются с результатами действительных экспериментов, входные данные которых соответствуют входу для экспериментов тестовой выборки.

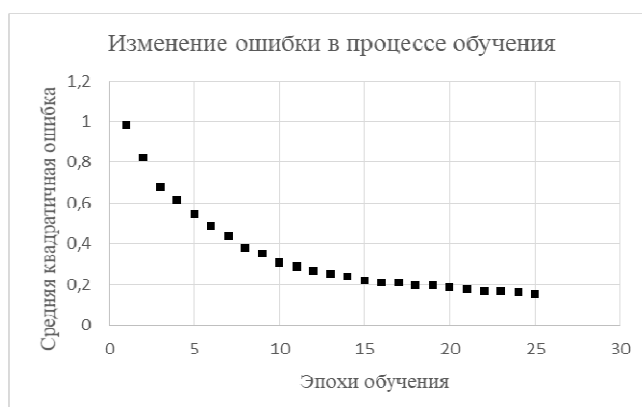


Рис.4 – Схождение модели

Оценка эффективности модели на новых данных

Для подтверждения эффективности представленной модели полирования плоскостей проведены несколько дополнительных экспериментов с параметрами полирования отличающихся от примеров обучающей и тестовой выборки. Для оценки эффективности модели также

используем среднеквадратичную ошибку. Величина среднеквадратичной ошибки результатов верификационных экспериментов, полученных с помощью нейронной сети составила 0,3. Расчетный показатель среднеквадратичной ошибки на тестовых данных равнялся 0,16. На данном этапе разработки алгоритма ошибку считаем приемлемой. Результаты экспериментов подтверждают прогнозы шероховатости поверхности, основанные на модели процесса полирования, которую построила нейронная сеть. На основе представленной модели при необходимости можно создать справочную таблицу для различного съема материала и шероховатости.

5. Выводы

Процесс полирования используется для повышения качества поверхностного слоя деталей и улучшения их механических свойств во многих отраслях производства. Большое количество факторов влияет на результирующую шероховатость, включая неравномерно распределённый припуск, форму поверхности, неоднородность свойств материала, различные внешние факторы в процессе полирования и результат также зависит от квалификации рабочих.

В данной работе для достижения требуемой шероховатости и обеспечения стабильного качества на операции полирования используются методы машинного обучения и метод контроля силы в процессе обработки. Применяя нейронные сети и силомоментный датчик совместно производится попытка оцувствления робота и обучение выполнению операции полирования по аналогии с человеком. Получена модель процесса полирования, построенная нейронной сетью, на основе которой можно прогнозировать шероховатость поверхности в зависимости от режимов полирования.

Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование нейронной сети, увеличение исследуемых параметров процесса полирования и повышение качества модели процесса полирования.

Библиографический список

1. Chen F. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector / F. Chen, H. Zhao, D. Li // Robot.Comput.-Integr. Manuf. – 2019. – Vol.57. – P. 391-403.
2. Hartmann C. An artificial neural network approach for tool path generation in incremental sheet metal free-forming / C. Hartmann, D. Opretescu, W. Volk // J Intell Manuf. – 2019. – №30. – P. 757-770.
3. Li K. Warpage optimization of fiberreinforced composite injection molding by combining back propagation neural network and genetic algorithm /

-
- Li K, Yan S, Pan W, Zhao G // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2017. – №90(1). – P. 963–970.
4. Mohammad A.E.K. Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm / A.E.K. Mohammad, J. Hong, D. Wang // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2017. – №93. – P. 1463–1471.
5. Mohammad A.E.K. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach / A.E.K. Mohammadab, J. Honga, D. Wanga // *Robot.Comput.-Integr. Manuf.* – 2018. – Vol.49. – P. 54–65.
6. Yu Y. Improved material removal model for robot polishing based on neural networks / Y. Yi, K. Lingbao, Z. Haitao, X. Min, W. Liping // *Infrared and Laser Engineering.* – 2019. – Vol.48(3). – P. 317005–0317005(8).
7. Вартанов М.В. Методы подавления вибраций при роботизированной обработке / М.В. Вартанов, Д.Н. Миронов, А.И. Шварц // «СТАНКОИНСТРУМЕНТ». – 2023. – №3 (032). – с. 34–41.

Bibliograficheskiy spisok

1. Chen F. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector / F. Chen, H. Zhao, D. Li // *Robot.Comput.-Integr. Manuf.* – 2019. – Vol.57. – P. 391–403.
2. Hartmann C. An artificial neural network approach for tool path generation in incremental sheet metal free-forming / C. Hartmann, D. Opritescu, Volk // *J Intell Manuf.* – 2019. – №30. – P. 757–770
3. Li K. Warpage optimization of fiberreinforced composite injection molding by combining back propagation neural network and genetic algorithm / Li K, Yan S, Pan W, Zhao G // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2017. – №90(1). – P. 963–970
4. Mohammad A.E.K. Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm / A.E.K. Mohammad, J. Hong, D. Wang // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2017. – №93. – P. 1463–1471.
5. Mohammad A.E.K. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach / A.E.K. Mohammadab, J. Honga, D. Wanga // *Robot.Comput.-Integr. Manuf.* – 2018. – Vol.49. – P. 54–65.
6. Yu Y. Improved material removal model for robot polishing based on neural networks / Y. Yi, K. Lingbao, Z. Haitao, X. Min, W. Liping // *Infrared and Laser Engineering.* – 2019. – Vol. 48(3). – P. 317005–0317005(8).

-
7. Vartanov M.V. Metody podavleniya vibracij pri robotizirovannoј obrabotke / M.V. Vartanov, D.N. Mironov, A.I. SHvarc // «STANKOINSTRUMENT». – 2023. – №3 (032). – s. 34-41.

¹Миронов Дмитрий Николаевич, ассистент,
*diman.mironov2010@gmail.com, Россия, Москва, Московский
политехнический университет*

²Вартанов Михаил Владимирович, д.т.н., профессор, профессор,
*m.v.vartanov@mospolytech.ru, Россия, Москва, Московский
политехнический университет*

*TECHNOLOGICAL QUALITY ASSURANCE FOR ROBOTIC
PROCESSING OF FLAT SURFACES*

D.N. Mironov, M.V. Vartanov

*The article discusses the technological quality assurance of robotic
polishing using neural networks.*

*Keywords: robotic polishing, surface quality, neural networks, cutting
parameters, force and torque sensor*

*Mironov Dmitry Nikolaevich, assistant, diman.mironov2010@gmail.com,
Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University*

*Vartanov Mikhail Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor,
professor, m.v.vartanov@mospolytech.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic
University*

РАБОТА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ПОВЫШЕННЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЯХ

Круговой А.Н.

Аннотация. При использовании в автоматизированных системах двигателей переменного тока с номинальной частотой трехфазного питающего напряжения 50 Гц возникает вопрос – что произойдет, если с помощью частотного преобразователя увеличивать частоту до значений 400...500 Гц. Угловая скорость вращающегося магнитного поля будет пропорционально увеличиваться, а ток и момент – уменьшаться, так как будет возрастать индуктивное сопротивление статорных обмоток. Это уменьшение можно компенсировать за счет увеличения амплитуды напряжения, но только до некоторого значения, которое может обеспечить частотный преобразователь. Задачей исследования является разработка моделей автоматизированного электропривода для определения максимально возможной угловой скорости в условиях конкретной технологической задачи.

Ключевые слова. Двигатель переменного тока, частота напряжений, угловая скорость, скольжение.

Для изменения угловой скорости асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором (АД) регулируют частоту переменного трехфазного напряжения, прикладываемого к статорным обмоткам двигателя. Возникает вопрос – до какого максимального значения можно увеличивать частоту, чтобы пропорционально увеличивалась угловая скорость. Современные частотные преобразователи (ЧП) способны увеличивать выходную частоту до 400...500 Гц [1], при этом для сохранения нагрузочной способности двигателя до напряжения 380В при трехфазном питании пропорционально частоте изменяют и амплитуду напряжения. Свыше указанной амплитуды увеличивается только частота, что приводит к пропорциональному уменьшению критического момента.

Динамика асинхронного электродвигателя описывается уравнением [2]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c,$$

где J и M_c – приведенные значения момента инерции и момента сопротивления (рассчитываются для конкретной технологической задачи); M – активный момент асинхронного двигателя, который может быть описан формулой Клосса [3...6]

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}},$$

где $M_{кр}$ – критический (максимальный) момент; S – скольжение; $S_{кр}$ – критическое скольжение. Скольжение определяется по формуле $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$,

где ω_0 – синхронная угловая скорость $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{\pi}{30} * \frac{60f}{p}$, где p – число пар полюсов двигателя; f – частота питающего трехфазного напряжения.

Модель разработана в среде Mathcad для асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 120 Вт.

Для исследования модели частота изменялась по линейному закону, график изменения частоты представлен на **Рис.1**. При этом график изменения угловой скорости изображён на **Рис.2**. Из графиков видно, что угловая скорость растет пропорционально частоте до 60 Гц, затем рост становится нелинейным, угловая скорость достигает максимума при значении частоты 120 Гц. При увеличении момента сопротивления максимум угловой скорости уменьшается по амплитуде и смещается в область меньших частот. Полученный график зависимости максимума угловой скорости от момента сопротивления представлен на **Рис.3**.

Для проверки теоретических данных создан экспериментальный стенд, внешний вид которого показан на **Рис.4**, а электрическая схема – на **Рис.5**.

Частота напряжения, прикладываемого к статорным обмоткам асинхронного двигателя М1, регулировалась с помощью частотного преобразователя ЧП, а момент сопротивления создавался с помощью двигателя постоянного тока М2, при этом ток якорной цепи регулировался с помощью переменного резистора R1.

Момент двигателя постоянного тока пропорционален току якоря

$$M_c = cI_{я}.$$

Коэффициент пропорциональности может быть определен из формулы

$$c = \frac{U_n - I_{ян} R_{я}}{\omega_{он}},$$

где $\omega_{он} = 0,105n_n$ – номинальная угловая скорость двигателя, n_n – номинальная частота вращения (об/мин), U_n – номинальное напряжение, $I_{ян}$ – номинальный ток якоря, $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи.

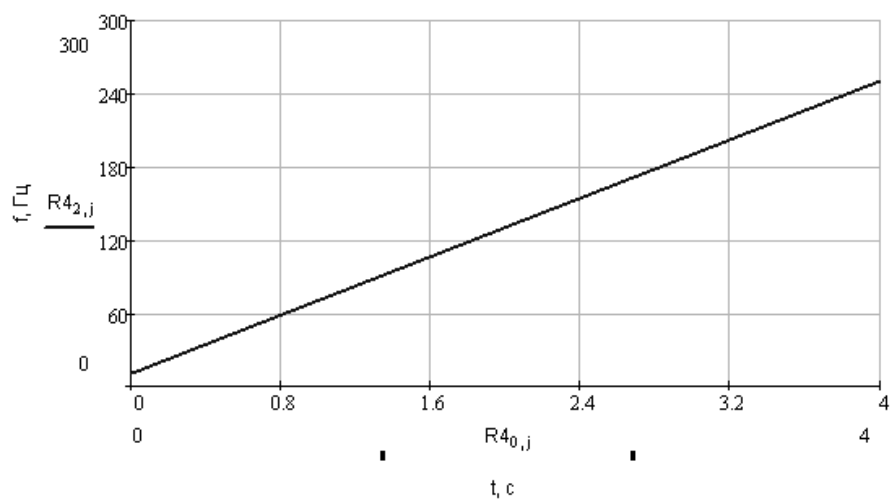


Рис.1 – График изменения частоты

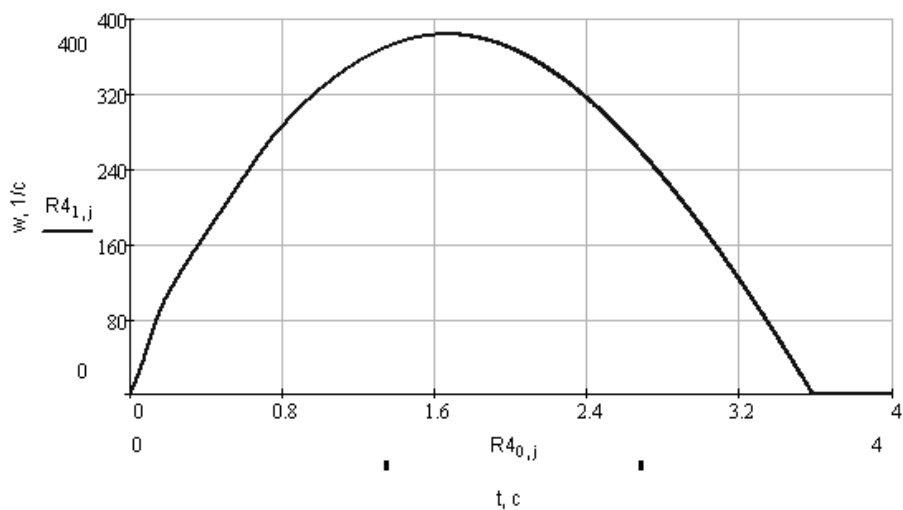


Рис.2 – График изменения угловой скорости

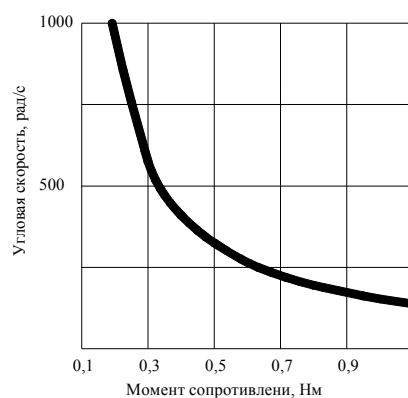


Рис.3 – Зависимость максимальной угловой скорости от момента сопротивления

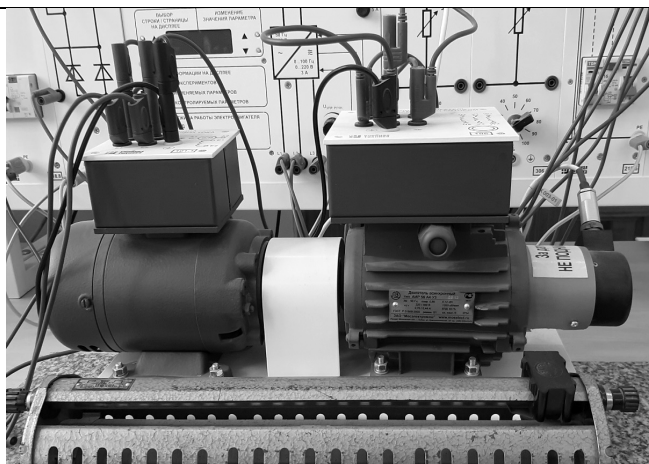


Рис.4 – Внешний вид экспериментального стенда

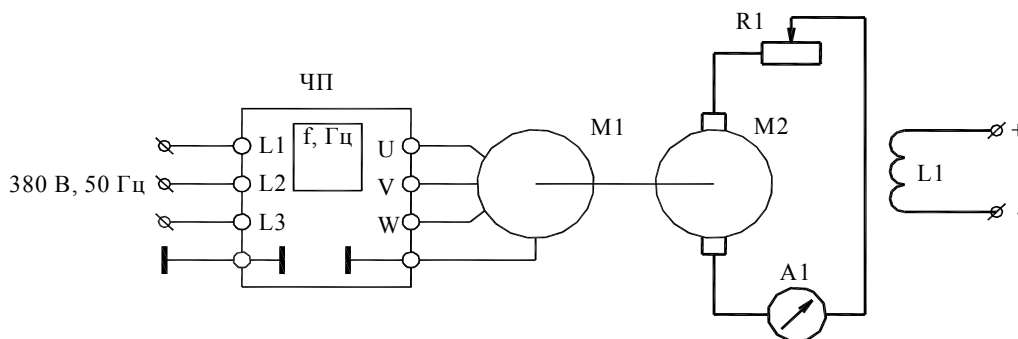


Рис.5 – Электрическая схема экспериментального стенда

Эксперименты подтвердили основные теоретические зависимости, погрешность не превысила 10%.

Таким образом, разработанные теоретические модели позволяют определять возможный диапазон регулирования угловой скорости асинхронного двигателя в условиях конкретной технологической задачи.

В дальнейшем предполагается проводить исследования по доработке конструкции асинхронного двигателя для более эффективной работы в режиме повышенных угловых скоростей.

Библиографический список

1. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей. Руководство по эксплуатации. Schneider Electric, 2007.
2. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование мехатронных модулей движения / Е.В. Пашков, А.Н. Круговой, В.А. Крамарь, Л.Л. Беляева, В.В. Альчаков; под ред. Е.В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с.

3. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с.
4. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод: учеб. пособие/ А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 232 с.
5. Дементьев Ю. Н. Проектирование электроприводов производственных механизмов. Ч. 1: учеб. пособие / С. Н. Кладиев, Томский политехн. ун-т, Ю. Н. Дементьев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 159 с.
6. Усольцев А.А. Электрический привод / учебное пособие, СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 238 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Preobrazovateli chastoti dlay acinhronnih dvigatelei. Rukovodstvo po ekspluatazii. Schneider Electric, 2007.
2. Pahkov E.V. Avtomatizazia v promihlennosti: Praktikum. V 4 h. h. III. Avtomatizirovannii elektroprivod i modelirovanie mehanotronnih modulei dvigenia/ E.V. Pahkov, A.N. Krugovoi, V.A. Kramar, L.L. Belaeva, V.V. Alhakov; pod. red. E.V. Pahkova. – Sevastopol: CevNTU, 2011. – 225 s.
3. Kluchev V.I. Teoriay elektroprivoda: uchebnik dlay vuzov / V.I. Kluchev – M.: Energoatomizdat, 1985. — 560с.
4. Dementiev U.N. Elektricheskii privod: ucheb. Posobie/ A.U. Chernishev, A.I. Chernishev – Tomsk: Izd-vo TPU, 2013. – 232 s.
5. Dementiev U.N. Proektirovanie elektroprivodov proizvodstvennih mehanizmov. Ch. 1: ucheb. Posobie/ S.N. Kladiev, Tomskii politeh. Un-t, U.I. Dementiev. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2013. – 159 s.
6. Usoltsev A.A. Elektricheskii privod/ uchebnoe posobie, SPb: NIU ITMO, 2012. – 238 s.

*Круговой Александр Николаевич, к.т.н., доцент, доцент,
atpp_krugovoi@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

OPERATION OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS AT ELEVATED ANGULAR VELOCITIES

A.N. Krugovoy

When using AC motors with a nominal frequency of a three-phase supply voltage of 50 Hz in automated systems, the question arises - what happens if using a frequency converter to increase the frequency to values of 400 ... 500 Hz. The angular velocity of the rotating magnetic field will increase proportionally, and the current and torque will decrease, as the

inductive resistance of the stator windings will increase. This decrease can be compensated by increasing the voltage amplitude, but only up to a certain value that the frequency converter can provide. The objective of the study is to develop models of an automated electric drive to determine the maximum possible angular velocity in the conditions of a specific technological task.

Keywords: AC motor, voltage frequency, angular velocity, sliding.

Krugovoy Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, docent, atpp_krugovoi@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УДК 519.674

**СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ГАМИЛЬТОНОВА ЦИКЛА ПУТЕМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ ВЕРШИН В
ПОДМНОЖЕСТВО**

Моисеев Д.В.¹, Поляков А.А.², Евстигнеев В.П.³, Воронин Д.Ю.⁴

Аннотация. Рассмотрен способ построения гамильтонова цикла путем объединения подмножеств и вершин в неориентированном полносвязанном симметричном взвешенном графе. Работа продолжает цикл проведения исследований авторами по поиску оптимального варианта для решения задачи коммивояжера. Настоящий способ относится к классу жадных алгоритмов. Наиболее близким к предлагаемому способу является метод, известный как «Алгоритм Прима».

Ключевые слова. Задача коммивояжера, алгоритм Прима, алгоритмизация, неориентированные графы, поиск кратчайшего пути в графе, поиск остова минимального веса.

Задача коммивояжера относится к классу NP-трудных задач, ее точное решение может быть получено за экспоненциальное время, решать задачу коммивояжера при большом числе вершин алгоритмом полного перебора не эффективно [1-5]. В связи с этим, проводились и будут проводиться исследования в поиске способа, который бы удовлетворял исследователя по времени и точности вычисления.

Предлагаемый авторами способ относится к классу жадных алгоритмов [1,5,6]. Данная работа продолжает цикл проведения исследований авторами по поиску оптимального варианта для решения задачи коммивояжера [7-13].

Наиболее близким к предлагаемому является способ, известный как «Алгоритм Прима», классический подход направлен для построения минимального весового остова дерева [14-15].

Цель настоящей работы заключается в повышении быстродействия построения гамильтонова цикла в неориентированном полносвязанном равновзвешенном графе.

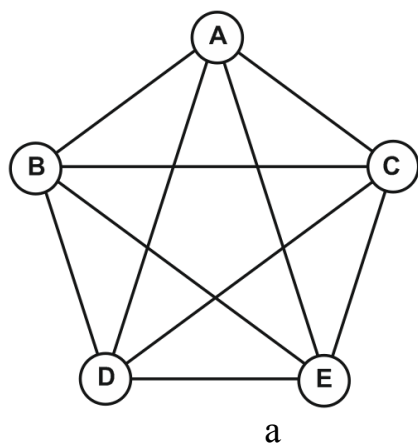
Результат достигается за счёт того, что проводится неполная неубывающая сортировка взвешенных рёбер, с целью определения вершин, которые связаны минимальным весом, выбирается одно парасочетание и объединяется в одно подмножество. Подмножество имеет

левую и правую границу, соединенную с другими вершинами по весу исходящих рёбер присоединенных вершин. Исходящие рёбра с наибольшими весами, расположенные на правые и левые границы подмножества и инцидентные другим вершинам графа, поочередно поглощаются исходящими ребрами с наименьшими весами, которые так же инцидентны этим же вершинам графа, осуществляется присоединение вершин в подмножество по инцидентным ребрам с минимальным весом. Инцидентные ребра вершин, расположенные между левой и правой границей подмножества, исключаются. Объединение вершин в подмножество продолжается пока все вершины графа не будут включены в одно подмножество. Закольцовывается правая и левая граница подмножества между собой.

Построение взвешенного минимального гамильтонова цикла осуществляется с построения неориентированного полносвязанного равновзвешенного конечного графа $G = (V, E)$, матрицы весов $M[V][V]$, где V – это число вершин в графе G , а E – число неориентированных взвешенных симметричных ребер в графе G , **Рис.1а**. Для каждого ребра (V_i, V_j) графа задан вес $w(V_i, V_j)$, вес симметричен $w(V_j, V_i)$. Промежуточным этапом при построении гамильтонова цикла является построение минимального полугамильтонова пути, который состоит в нахождении подмножества $T \subset E$, связующего все вершины, для которых суммарный вес минимальный, при условии, что каждая вершина посещается один раз:

$$w(T) = \min \sum_{(i,j) \in T} w(V_i, V_j). \quad (1)$$

На основании графической части строится матрица весов $M[V][V]$ **Рис.1б**, задается одномерный массив $S[E]$ **Рис.2а**, в $S[E]$ проводится неполная сортировка ребер E .



	A	B	C	D	E
A		1	1	2	2
B			2	1	2
C				2	1
D					1
E					

б

Рис.1 – Построение минимального полугамильтонова пути

Пусть $E_i G$ ребро минимального веса в графе, вершины связанные между собой минимальным весом перемещаются в начало массива $S[E]$, сортировка прекращается **Рис.2б**.

A-B	A-C	A-D	A-E	B-C	B-D	B-E	C-D	C-E	D-E
B-A	C-A	D-A	E-A	C-B	D-B	E-B	D-C	E-C	E-D
1	1	2	2	2	1	1	2	1	1

а

A-B	A-C	B-D	B-E	C-E	D-E	A-D	A-E	B-C	C-D
B-A	C-A	D-B	E-B	E-C	E-D	D-A	E-A	C-B	D-C
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

б

Рис.2 – Сортировка вершин в графе

Осуществляется обход матрицы весов ребер $M[V][V]$, проводится объединение вершин в подмножество по минимальному весу инцидентного ребра, **Рис.3а,б**.

	A	B	C	D	E
A		1	1	2	2
B			2	1	2
C				2	1
D					1
E					

а

	A	B	C	D	E
A	L(AB)=1		1	2	2
B			2	1	2
C				2	1
D					1
E					

б

Рис.3 – Обход матрицы весов ребер $M[V][V]$

Проводится проверка построен ли полугамильтонов путь, если нет, то продолжается объединение вершин в подмножество.

Пусть существует подмножество $V_i, V_f, \dots, V_z, V_j$ на основании проведенной процедуры, где V_i – является левой l границей подмножества, V_j – является правой r границей подмножества,

проводится попарное поглощение на границах r и l подмножеств инцидентных рёбер с наибольшим весом, **Рис.4а,б**.

	A	B	C	D	E
A	L(AB)=1		1	2	2
B			2	1	2
C				2	1
D					1
E					

а

	A	B	C	D	E
A	L(AB)=1		1		2
B				1	2
C				2	1
D					1
E					

б

Рис.4 – Попарное поглощение подмножеств инцидентных рёбер с наибольшим весом

Далее проводится исключение инцидентных рёбер вершин, расположенных между левой l и r правой границей подмножества, **Рис.5а,б**, данная операция позволяет исключить дальнейшее появление циклов при соединении вершин к подмножеству.

	C	A	B	D	E
C	L(CAB)=2			2	1
A					2
B				1	2
D					1
E					

а

	C	A	B	D	E
C	L(CAB)=2				1
A					
B				1	
D					1
E					

б

Рис.5 – Исключение инцидентных рёбер вершин, расположенных между левой l и r правой границей подмножества

Объединение вершин продолжается, пока все вершины графа не будут включены в одно подмножество - полугамильтонов путь **Рис.6а,б**. Для построения минимального гамильтонова цикла проводится закольцовывание правой r и l левой граница подмножества между собой, гамильтонов цикл построен. Закольцовывание проводится по инцидентной связи между вершинами правой r и l левой границы подмножества представленной в массиве $S[E]$.

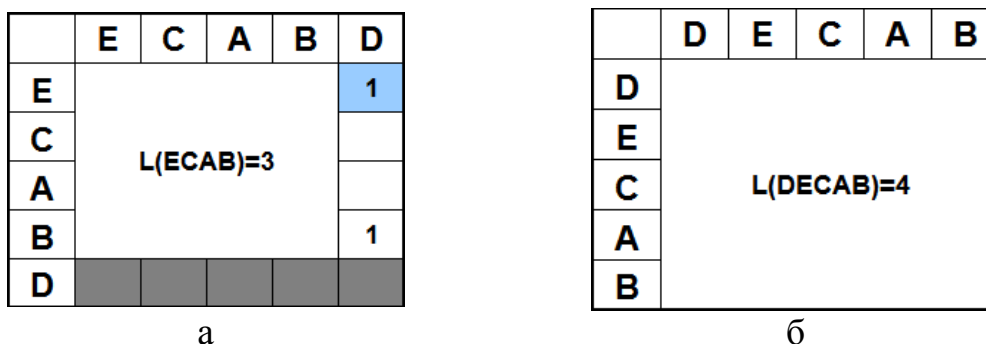


Рис.6 – Закольцовывание правой r и l левой граница подмножества между собой

Время работы предлагаемого способа построения минимального взвешенного гамильтонова цикла путём объединения вершин в подмножество в неориентированном полносвязанном равновзвешенном графе составляет:

$$O(E \lg V). \quad (2)$$

Алгоритм построения гамильтонова цикла путем последовательного объединения непересекающихся подмножеств и вершин представлен в виде блок-схемы **Рис.7**.

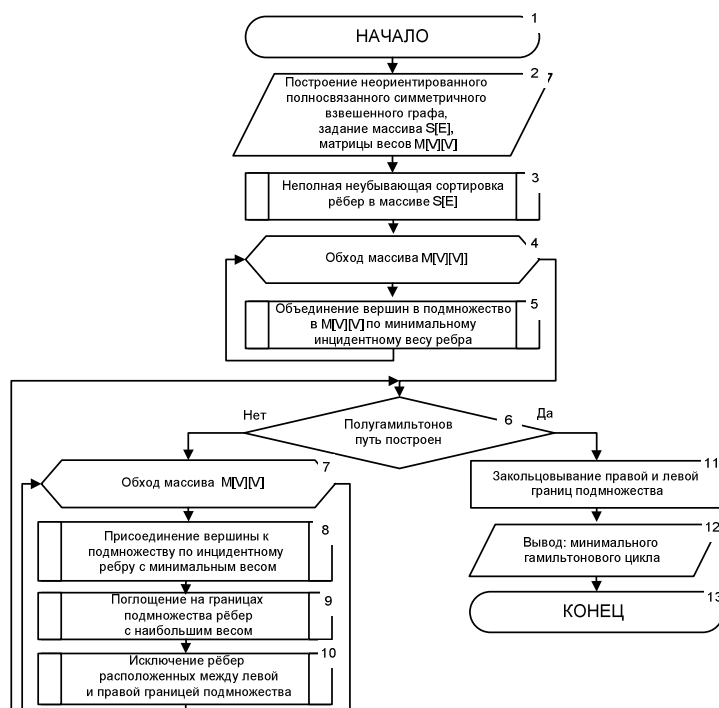


Рис.7 - Алгоритм построения гамильтонова цикла путем последовательного объединения непересекающихся подмножеств и вершин

Выводы. Настоящий способ построения гамильтонова цикла путем последовательного объединения вершин в подмножество подходит для графов, где минимальный путь прокладывается по периметру фигуры, которые образуют вершина графа. Рассматриваемый способ не является универсальным, так как для структурно-сложных графов, способ будет давать недостаточно точное решение.

Технико-экономическая эффективность предлагаемого способа заключается в повышении быстродействия при построении взвешенного гамильтонова цикла путём последовательного объединения непересекающихся подмножеств и вершин в неориентированном полносвязанном равновзвешенном конечном графе, с допустимой точностью свойственной «жадным» алгоритмам.

Работа выполнена при поддержке департамента науки и образования г. Севастополя.

Библиографический список

1. Поляков А.А. Построение гамильтонова пути способом расширяющейся выделенной области / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев, Е.Н. Мащенко // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2022. – № 3(19). – С. 52-59.
2. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 419 с.
3. Борознов В.О. Исследование эвристического метода решения задачи коммивояжера / В.О. Борознов // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2008. – С. 322–328.
4. Сайт Ревотюк М.П., Кот О.В. Реоптимизация решения задач коммивояжера методом эластичных сетей [электрон. ресурс]. Режим доступа:
<https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/26005/1/reoptimizactiya.PDF>.
5. Кормен, Томас Х. и др. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. – 670 с.
6. Колесников А.В. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А.В. Колесникова. – М.: ИПИ РАН, 2011. – 295 с.
7. Моисеев Д.В., Поляков А.А., Программа для ЭВМ № 2022683555, Построение гамильтонова пути способом расширяющейся выделенной области. Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», дата подачи заявки: 23.11.2022, дата

-
- гос. регистрации: 06.12.2022, дата публикации: 06.12.2022, номер заявки: 2022682657.
8. Моисеев Д.В., Поляков А.А., Программа для ЭВМ № 2022684330, Перестроение структуры гамильтонова пути способом переоценки весов ребер построенного пути с весами ребер к ближайшей инцидентной вершине предполагаемого пути. Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», дата подачи заявки: 23.11.2022, дата гос. регистрации: 13.12.2022, дата публикации: 13.12.2022, номер заявки: 2022682702.
9. Моисеев Д.В., Поляков А.А., Программа для ЭВМ № 2022683676, Перестроение структуры гамильтонова пути способом переоценки веса ребер построенного пути с весом ребер локального предполагаемого минимума. Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», дата подачи заявки: 23.11.2022, дата гос. регистрации: 07.12.2022, дата публикации: 07.12.2022, номер заявки: 2022682703.
10. Моисеев Д.В., Поляков А.А., Программа для ЭВМ № 2022683473, Перестроение структуры гамильтонова пути способом переоценки весов ребер построенного пути с весами ребер предполагаемого пути. Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», дата подачи заявки: 23.11.2022, дата гос. регистрации: 05.12.2022, дата публикации: 05.12.2022, номер заявки: 2022682665.
11. Поляков А.А. Комплекс методик декомпозиции структурно-сложных систем различного назначения / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal) Warsaw, Poland.: «Jerozolimskie»*. – 2019. – № 7(47). – С. 66-70.
12. Поляков А.А. Методика полной декомпозиции структуры технической системы / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // *Сборник научных трудов «Национальная ассоциация ученых» Екатеринбург: 620144*. – 2019. – № 45. – С. 28-31.
13. Поляков А.А. Вычисление показателя надежности функциональных элементов в технических, организационно-технических системах / А.А. Поляков, Д.В. Моисеев // *Сборник Международного научного форума «Наука и инновации - современные концепции» М.: Инфинити*. – 2019 – С. 118-126.

14. Kureichick V.M., Miagkikh V. V. Genetic Algorithm for Solution of the Traveling Salesman Problem with New Features against Premature Convergence. – 1996. – pp. 1-6.
15. Борознов В.О. Исследования генетических методов решения задачи коммивояжера / В.О. Борознов, О.Г. Ведерникова // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 42-45.

Bibliograficheskij spisok

1. Polyakov A.A. Postroenie gamil'tonova puti sposobom rasshiryayushchejsya vydelennoj oblasti / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev, E.N. Mashchenko // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – 2022. – № 3(19). – S. 52-59.
2. Geri M. Vychislitel'nye mashiny i trudnoreshaemye zadachi / M. Geri, D. Dzhonson. – M.: Mir, 1982. – 419 s.
3. Boroznov V.O. Issledovanie evristicheskogo metoda resheniya zadachi kommivoyazhera / V.O. Boroznov // Elektronnyj zhurnal «Issledovano v Rossii». – 2008. – S. 322–328.
4. Sajt Revotyuk M.P., Kot O.V. Reoptimizaciya resheniya zadach kommivoyazhera metodom elastichnyh setej [elektron. resurs]. Rezhim dostupa:
<https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/26005/1/reoptimizaciya.PDF>.
5. Kormen, Tomas H. i dr. Algoritmy: postroenie i analiz, 3-e izd.: Per. s ang. – M.: OOO «I.D. Vil'yams», 2013, S. 668-670.
6. Kolesnikov A.V. Reshenie slozhnyh zadach kommivoyazhera metodami funkcional'nyh gibridnyh intellektual'nyh sistem / Pod red. A.V. Kolesnikova. – M.: IPI RAN, 2011. – 295 s.
7. Moiseev D.V., Polyakov A.A., Programma dlya EVM № 2022683555, Postroenie gamil'tonova puti sposobom rasshiryayushchejsya vydelennoj oblasti. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet», data podachi zayavki: 23.11.2022, data gos. registracii: 06.12.2022, data publikacii: 06.12.2022, nomer zayavki: 2022682657.
8. Moiseev D.V., Polyakov A.A., Programma dlya EVM № 2022684330, Perestroenie struktury gamil'tonova puti sposobom pereocenki vesov reber postroennogo puti s vesami reber k blizhajshej incidentnoj vershine predpolagaemogo puti. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet», data podachi zayavki:

-
- 23.11.2022, data gos. registracii: 13.12.2022, data publikacii: 13.12.2022, nomer zayavki: 2022682702.
9. Moiseev D.V., Polyakov A.A., Programma dlya EVM № 2022683676, Perestroenie struktury gamil'tonova puti sposobom pereocenki vesa reber postroennogo puti s vesom reber lokal'nogo predpolagaemogo minimuma. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet», data podachi zayavki: 23.11.2022, data gos. registracii: 07.12.2022, data publikacii: 07.12.2022, nomer zayavki: 2022682703.
10. Moiseev D.V., Polyakov A.A., Programma dlya EVM № 2022683473, Perestroenie struktury gamil'tonova puti sposobom pereocenki vesov reber postroennogo puti s vesami reber predpolagaemogo puti. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet», data podachi zayavki: 23.11.2022, data gos. registracii: 05.12.2022, data publikacii: 05.12.2022, nomer zayavki: 2022682665.
11. Polyakov A.A. Kompleks metodik dekompozicii strukturno-slozhnyh sistem razlichnogo naznacheniya / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal) Warsaw, Poland.: «Jerozolimskie». – 2019. – № 7(47). – S. 66-70.
12. Polyakov A.A. Metodika polnoj dekompozicii struktury tekhnicheskoy sistemy / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // Sbornik nauchnyh trudov «Nacional'naya asociaciya uchenykh» Ekaterinburg: 620144, № 45, 2019. – S. 28 – 31.
13. Polyakov A.A. Vychislenie pokazatelya nadezhnosti funkcional'nyh elementov v tekhnicheskikh, organizacionno-tekhnicheskikh sistemah / A.A. Polyakov, D.V. Moiseev // Sbornik Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma «Nauka i innovacii - sovremennye koncepcii» M.: Infiniti. – 2019 – S. 118-126.
16. 14. Kureichick V.M., Miagkikh V. V. Genetic Algorithm for Solution of the Traveling Salesman Problem with New Features against Premature Convergence. – 1996. – pp. 1-6.
15. Boroznov V.O. Issledovaniya geneticheskikh metodov resheniya zadachi kommivoyazhyora / V.O. Boroznov, O.G. Vedernikova // Vestn. Rostov. gos. un-ta putej sobshcheniya. – 2004. – № 1. – S. 42-45.

¹*Моисеев Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой, dvmoiseev@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²Поляков Александр Александрович, к.т.н., доцент, sansanich44@mail.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище им. П.С. Нахимова.

³Евстигнеев Владислав Павлович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, vpevstigneev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет.

⁴Воронин Дмитрий Юрьевич, к.т.н., заведующий кафедрой, voronin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет

*A METHOD FOR CONSTRUCTING A HAMILTONIAN CYCLE BY
SEQUENTIALLY COMBINING VERTICES INTO A SUBSET CONSTRUCTION
OF A HAMILTONIAN PATH USING THE METHOD OF EXPANDING THE
SELECTED AREA*

D.V. Moiseev, A.A. Polyakov, V.P. Evstegneev, D.Yu. Voronin

The article raises the question of how to construct a Hamiltonian cycle by combining subsets and vertices in an undirected fully connected symmetric weighted graph. The work continues with a cycle of research by the authors to find possible solutions to the traveling salesman problems. This method belongs to the class of greedy algorithms. Closest to the proposed method is the method known as "Prim's Algorithm".

Keywords: traveling salesman problem, Prim's algorithm, algorithmization, undirected graphs, finding the shortest path in a graph, finding a minimum weight spanning tree.

Moiseev Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, docent, head department, dvmoiseev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Polyakov Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, sansanich44@mail.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after. P.S. Nakhimov.

Evstigneev Vladislav Pavlovich, candidate of physics and mathematics sciences, senior researcher, vpevstigneev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

Voronin Dmitry Yurievich, candidate of technical sciences, head department, voronin@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВА РАВЕНСТВА ОПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОДЫНТЕГРАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Бохонский А.И.¹, Варминская Н.И.²

Аннотация. На ряде примеров показано, что численное равенство определенных интегралов с различными подынтегральными функциями возможно, если пределами интегрирования являются корни уравнений первообразных. В случае заданного времени (в функционалах-критериях оптимальности) переносного движения объекта условие равенства определенных интегралов позволяет находить эквивалентные управления (т.е. переносные ускорения), которые также приводят к достижению цели движения с сохранением прежних энергетических затрат.

Ключевые слова. Определенный интеграл, первообразная, пределы интегрирования, оптимальное управление, эквивалентное преобразование, динамика объекта.

Введение. Задачам управления движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем посвящены работы [1-3] и другие.

При использовании алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления (названного реверсионным) поиска оптимальных управлений движением объекта возможно не единственное решение, то есть, например, появление двух функционалов-критериев [4-8].

В задаче управления типа «разгон-торможение» обычно время движения и перемещение задаются заранее, однако возможны случаи, когда из условия равенства определенных интегралов требуется находить параметры другого (эквивалентного по энергоемкости) управления. В этом случае применимо данное свойство определенных интегралов.

В работах [4,5,9] обосновано это свойство определенных интегралов с различными подынтегральными функциями. Показано, что определенные интегралы численно равны в пределах интегрирования, которые находятся как корни уравнения, образованного из равенства первообразных. В [9] приводится ряд примеров, иллюстрирующих данное свойство.

Цель исследований – иллюстрация на характерных примерах применения свойства численного равенства определенных интегралов с различными подынтегральными функциями с анализом конструируемых оптимальных управлений движением объектов.

Основная часть

Пример 1.

Заданы определенные интегралы

$$\int_{t_1}^{t_2} f_1(t)dt \text{ и } \int_{t_1}^{t_2} f_2(t)dt$$

с непрерывными подынтегральными функциями

$$f_1(t) = t^2 + 2t^3, \quad f_2(t) = t + 5t^4 - 8..$$

Интегралы образуют уравнение первообразных

$$F_1(t) - F_2(t) = 0, \quad (1)$$

где после интегрирования $F_1(t) = \frac{t^3}{3} + \frac{t^4}{2}, \quad F_2(t) = \frac{t^2}{2} + t^5 - 8t.$

Из уравнения (1) получены три корня:

$$t_1 = -1,6536; \quad t_2 = 0,0; \quad t_3 = 1,8326. \quad (2)$$

С учетом (2) следует численное равенство интегралов:

$$\int_{t_1}^{t_3} f_1(t)dt = \int_{t_1}^{t_3} f_2(t)dt = 5,46086.$$

Пример 2. В работах [6-7] приведен пример, в котором в результате реверсионного восстановления получены два функционала при одной заданной исходной аналитической функции. Показано, что существуют такие пределы интегрирования, для которых эти интегралы численно равны. Неединственность восстановления функционалов по заданным функциям, вместе с тем, подтверждает их численное равенство в найденных пределах интегрирования как корней (t_1, t_2) уравнения первообразных.

Пример 3. В работах [4,9] представлены различные варианты решения полной обратной задачи вариационного исчисления при поиске оптимальных управлений переносным движением абсолютно твердых, а также деформируемых объектов – из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя (с заданием перемещения и времени движения).

Из полученных в результате обобщений универсальных аналитических зависимостей следуют частные случаи выражений для перемещения, скорости и ускорения (управления) при заранее задаваемой степени полинома ускорения.

Для степени полинома ускорения $n = 1$ следует известный классический случай управления (прямая задача Лагранжа):

$$S_1 = \frac{Lt^2}{T^3}(3T - 2t), \quad V_1 = \frac{6Lt}{T^3}(T - t), \quad U_1 = \frac{6L}{T^3}(T - 2t).$$

Решение прямой задачи в этом случае найдено, как известно, с использованием критерия оптимальности:

$$J_1 = \int_0^T U_1^2 dt.$$

Если степень полинома ускорения $n = 3$, то из универсальных зависимостей [4, 5] следует:

$$S_3 = \frac{Lt^2}{T^5}(5t^3 - 10T^2t + 10Tt^2 - 4t^3),$$

$$V_3 = \frac{10Lt}{T^5}(T - t)(2t^2 - 2Tt + T^2), \quad U_3 = \frac{10L}{T^5}(T - 2t)^3.$$

Для этого случая при решении прямой задачи должен использоваться критерий

$$J_3 = \int_0^T \dot{U}_3^2 dt.$$

$$\text{Здесь } \dot{U}_3 = \frac{dU_3}{dt} = -\frac{60L}{T^5}(T - 2t)^2.$$

Из уравнения (равенства первообразных с одинаковыми пределами интегрирования)

$$\int_0^{T/2} U_1^2 dt - \int_0^{T/2} U_3^2 dt = 0$$

с использованием функции *solve* (Maple) для времени движения получены корни: $T_1 = 2\sqrt{15}$; $T_2 = -2\sqrt{15}$.

Важно отметить, что для корня $T_1 = 2\sqrt{15} = 7,7459$ с, соответствующего физическому смыслу задачи, $J_1 \neq J_2$ и $A_1 \neq A_2$, где

$$J_1 = \int_0^{T/2} U_1^2 dt, \quad J_2 = \int_0^{T/2} U_3^2 dt,$$

т.е. характеры движения различны.

Однако, для $n = 3$ наблюдается экономия энергии при реализации переносного движения [7].

Использованное управление $U_3(t)$ приводит к экономии энергии

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \cdot 100 = 30,55$$

на 30,55%. Здесь $A_1 = 2 \int_0^{T/2} U_1 V_1 dt$, $A_3 = 2 \int_0^{T/2} U_3 V_3 dt$. В обоих случаях цель оптимального переносного движения достигается.

Преобразование реверсионно конструируемого управления в эквивалентное

Предложен алгоритм эквивалентного преобразования исходного оптимального управления типа «разгон-торможение» в такой, который упрощает практическую реализацию управления.

Алгоритм эквивалентного преобразования реверсионно восстановленного функционала с учетом энергии на реализацию движения основан на использовании свойства численного равенства определенных интегралов с различными подынтегральными функциями. Вместо заранее уже известных пределов интегрирования находятся необходимые параметры эквивалентного управления. Затрачиваемая на реализацию движения энергия при $n = 3$ равна: $A_3 = 2 \int_0^{T/2} U_3 V_3 dt = 1,5625 \frac{L^2}{T^2}$.

Реверсионное конструирование оптимальных ускорений приводит, как было отмечено, к экономии энергии, т.е. просматривается отдаленная аналогия с принципом наименьшего принуждения К.Ф.Гаусса – с наименьшим энергетическим принуждением [10].

В качестве эквивалентного управления принята функция:

$$U(t) = C_1 \sin(pt) + C_2 \cos(2pt),$$

где C_1 , C_2 , p – константы, подлежащие определению. После интегрирования с учетом движения из состояния покоя ($S(0) = 0$, $V(0) = 0$), выражения для перемещения и скорости принимают вид:

$$S(t) = \left(t - \frac{\sin(pt)}{p} \right) \frac{C_1}{p} + \left(t - \frac{\sin(2pt)}{2p} \right) \frac{C_2}{2p},$$

$$V(t) = (1 - \cos(pt)) \frac{C_1}{p} + (1 - \cos(2pt)) \frac{C_2}{2p}.$$

Константы C_1 и C_2 находятся из задаваемых необходимых условий алгоритма эквивалентных преобразований – равенств перемещения и энергии. При заданных исходных данных ($L = 1$ м, $m = 1$ кг, $n = 3$, $p = 4$, $T = \pi/2$ с) следует система уравнений

$$S(T) - L = 0, \quad 2 \int_0^{T/2} UV dt - 1,5625 \frac{L^2}{T^2} = 0,$$

из которой $C_1 = 1,5915$; $C_2 = 1,9098$.

Получены следующие выражения для ускорения (управления), скорости и перемещения в эквивалентной системе:

$$U(t) = 1,5915 \sin(4t) + 1,9098 \sin(8t),$$

$$V(t) = -0,3979 \cos(4t) - 0,2387 \cos(8t) + 0,6366,$$

$$S(t) = -0,0995 \sin(4t) - 0,0298 \sin(8t) + 0,6366t.$$

Графики $U(t)$, $V(t)$ и $S(t)$ изображены на **Рис.1**.

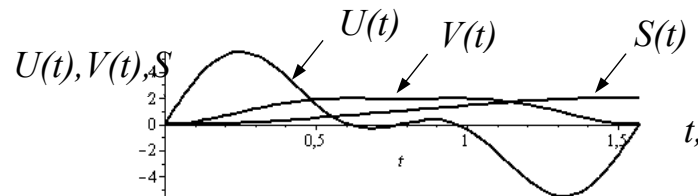


Рис.1 – Графики движения $S(t)$, $V(t)$, $U(t)$ с эквивалентным управлением

Дополнительные проверки подтверждают близость полученного эквивалентного управления (**Рис.1,2,3**) к используемому реверсионному прототипу управления.

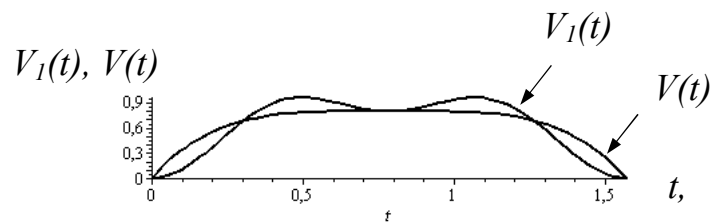


Рис.2 – Графики скоростей $V_1(t)$ и $V(t)$

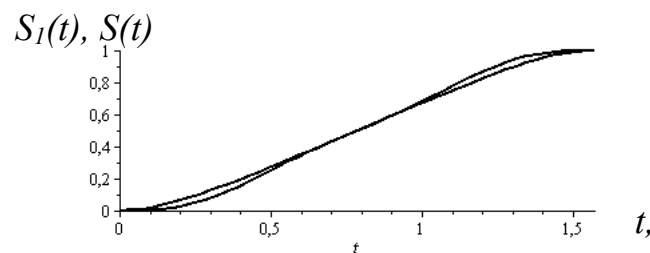


Рис.3 – Графики оптимального перемещения (исходного и эквивалентного)

Графики подтверждают достижение конечной цели движения при использовании найденного эквивалентного управления, обеспечивающего достижение нового состояния покоя.

Выводы.

Процедура замены реверсионно полученного оптимального управления эквивалентным применима при любой степени полинома ускорения ($n = 3, 5, 7, 9$).

Библиографический список

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
2. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Вища шк., 1982. – 116 с.
3. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
4. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
5. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
6. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С.-Пб.: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
7. Бохонский А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – № 1 (351). – С.15– 20.
8. Бохонский А.И. Алгоритм конструирования оптимального движения упругого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. – № 4 (348). – С.33 – 38.
9. Бохонский А.И. Равенство определенных интегралов с различными подынтегральными функциями / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская // Фундаментальные основы механики. – С.-Пб.: НИЦ МС, 2023. – № 11. – С. 18 – 22.
10. Маркеев А.П. О принципе наименьшего принуждения / А.П. Маркеев // Соросовский образовательный журнал. – Вып. 1. – 1998. – С. 113 – 121.

Bibliograficheskiy spisok

1. Krasovsky N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem / N.N. Krasovsky. – M.: Nauka, 1968. – 476 s.
2. Karnovsky I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemykh sistem / I.A. Karnovsky, Yu.M. Pochtman. – K.: Vishcha shk., 1982. – 116 s.

3. Butkovsky A.G. Metody upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami / A.G. Butkovsky. – M.: Nauka, 1975. – 568 s.
4. Bokhonsky A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bokhonsky. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016. – 174 s.
5. Bokhonsky A.I. Mekhanika upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – M.: INFRA-M, 2021. – 170s.
6. Bokhonsky A.I. Konstruirovaniye optimal'nykh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya. – S.-Pb.: NIC MS, 2020. – 120 s.
7. Bokhonsky A.I. Ocenka energoemkosti minimal'nogo prinuzhdeniya celenapravlenno go dvizheniya ob"ekta / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. – № 1 (351). – S. 15 – 20.
8. Bokhonsky A.I. Algorit m konstruirovaniya optimal'nogo dvizheniya uprugogo ob"ekta / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya, A.I. Ryzhkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. – № 4 (348). – S. 33 – 38.
9. Bokhonsky A.I. Ravenstvo opredelennykh integralov s razlichnymi podintegral'nymi funkciyami / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya // Fundamental'nye osnovy mekhaniki. – S.-Pb.: NIC MS, 2023. – № 11. – S. 18 – 22.
10. Markeev A.P. O principe naimen'shego prinuzhdeniya / A.P. Markeev // Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. – Vyp. 1. – 1998. – S. 113 – 121.

¹*Бохонский Александр Иванович, д.т.н., профессор, профессор, bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Варминская Наталья Ивановна, к.т.н., доцент, заведующая. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова*

*USING THE PROPERTY OF EQUALITY OF CERTAIN INTEGRALS
WITH DIFFERENT SUBINTEGRAL FUNCTIONS*

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya

A number of examples show that the numerical equality of certain

integrals with different integrative functions is possible if the integration limits are the roots of the primordial equations. In the case of a given time (in functionals- optimality criterion) of the translational motion of an object, the condition of equality of certain integrals allows to find equivalent controls (i.e. translational accelerations) that also lead to the achievement of the movement goal while maintaining the previous energy costs.

Keywords: definite integral, antiderivative, limits of integration, optimal control, equivalent transformation, plant dynamics.

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

УДК 621.923.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СО СФЕРИЧЕСКОЙ ЗАСЛОНКОЙ

Васютенко А.П.¹, Балакина Н.А.²

Аннотация. Рассмотрены схемы первичных пневматических преобразователей для линейных измерений, оценены их достоинства и недостатки. Приведен вывод формулы статической характеристики преобразователя со сферической заслонкой и результаты моделирования его характеристик при различных сочетаниях исходных параметров. На основе анализа статических характеристик определены значения прямолинейных участков и чувствительности. Проведена сравнительная оценка метрологических характеристик пневматических преобразователей со сферической и плоской заслонками.

Ключевые слова. Измерение, преобразователь, пневматика, сопло-заслонка, чувствительность, погрешность, диапазон измерения.

Средства измерения, реализующие пневматический принцип измерения, обладают рядом существенных достоинств: малыми габаритными размерами измерительной оснастки, позволяющими производить многопараметрический контроль в условиях ограниченных размеров рабочей зоны, нечувствительностью к вибрациям, простотой конструкции и надёжностью работы. Широкое применение пневматические преобразователи находят в средствах технологического контроля, по результатам которого формируются команды, управляющие режимами работы станочного оборудования [1-4]. К таким средствам относятся приборы активного контроля и подналадочные измерительные системы, которые работают в условиях воздействия абразивной пыли, смазочно-охлаждающей жидкости и вибрации узлов станка [4-6]. Пневматические преобразователи по конструкции и принципу действия отвечают указанным условиям эксплуатации.

Целью работы является повышение чувствительности и расширение диапазона измерения пневматических приборов на основе исследования преобразователей со сферической заслонкой.

Статическую характеристику пневматического измерительного преобразователя с достаточной точностью можно описать следующим выражением:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^2 \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} = \frac{H}{1 + \left(\frac{4d_2}{d_1^2}\right)^2 z^2}, \quad (1)$$

где h – измерительное давление воздуха; H – рабочее давление воздуха, α_1 , α_2 – коэффициенты расхода воздуха; F_1 , F_2 – площади истечения воздуха через входное и измерительное сопла; d_1 – диаметр входного сопла; d_2 – диаметр измерительного сопла; z – зазор между заслонкой и измерительным соплом.

Выражение (1) получено при некоторых допущениях $(\alpha_2 / \alpha_1)^2 \approx 1$; $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ на основе зависимостей, описывающих расход воздуха через входное и измерительное сопла при турбулентном режиме течения [7]:

$$G_1 = F_1 \alpha_1 \varepsilon_1 \sqrt{2\rho_1} \sqrt{H - h}, \quad (2)$$

$$G_2 = F_2 \alpha_2 \varepsilon_2 \sqrt{2\rho_2} \sqrt{H}, \quad (3)$$

где G_1 , G_2 – расход воздуха через входное и измерительное сопла; α_1 , α_2 – коэффициенты расхода воздуха; ε_1 , ε_2 – коэффициенты, учитывающие изменение плотности воздуха при прохождении через пневмосопротивления; ρ_1 , ρ_2 – плотность воздуха.

Схема первичного пневматического преобразователя со сферической заслонкой (шарикового типа) [8,9] представлена на **Рис.1**, где используются следующие параметры: d_1 – диаметр отверстия входного сопла 1, d_u – диаметр шарика 2, d_2 – диаметр отверстия измерительного сопла 3, l_0 – расстояние от центра шарика до торцевой поверхности сопла, d – текущий размер хорды шарика, при наличии кольцевого воздушного зазора между шариком 2 и торцевой поверхностью сопла 3, Δl – величина вертикального перемещения шарика ($\Delta l = \Delta b$), b – толщина контролируемой детали 4.

Вывод уравнения $h = f(l)$ проводился следующим образом: из $\triangle OO_1A$ (рис. 1, а) находим l_0 – расстояние от внутренней торцевой поверхности измерительного сопла 3 до центра шарика при их контакте:

$$l_0 = \sqrt{\left(\frac{d_u}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{d_u^2}{4} - \frac{d_2^2}{4}}, \quad (4)$$

$$l_0 = \frac{1}{2} \sqrt{d_u^2 - d_2^2}. \quad (5)$$

Площадь кольцевого зазора между шариком 2 и внутренней торцевой поверхностью сопла 3 (**Рис.1б**) определяется из выражения:

$$F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}. \quad (6)$$

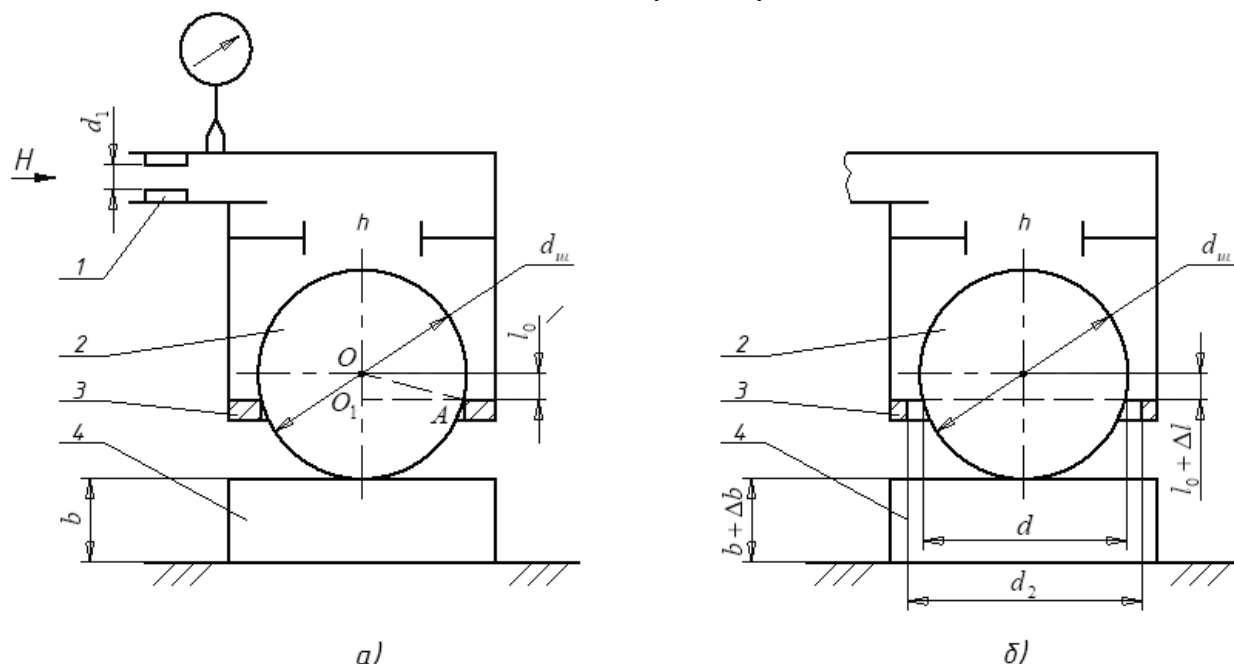


Рис.1 – Схема пневматического преобразователя шарикового типа:
а) с нулевым воздушным зазором; б) с кольцевым воздушным зазором

Значение текущего размера хорды d шарика при наличии кольцевого воздушного зазора между шариком и торцевой поверхностью сопла определится из выражения:

$$\frac{d}{2} = \sqrt{\left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^2 - (l_0 + \Delta l)^2}, \quad (7)$$

$$d = 2\sqrt{\left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^2 - (l_0 + \Delta l)^2}. \quad (8)$$

После подстановки d и l_0 в формулу (6) получим выражение для расчета площади кольцевого зазора между шариком и торцом измерительного сопла:

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi}{4} \cdot 4 \left[\left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^2 - (l_0 + \Delta l)^2 \right] = \frac{\pi d_2^2}{4} - \pi \left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^2 + \pi (l_0 + \Delta l)^2 = \\ &= \frac{\pi d_2^2}{4} - \pi \left(\frac{d_{ш}}{2}\right)^2 + \pi \left[\frac{1}{2} \sqrt{d_{ш}^2 - d_2^2} + \Delta l \right]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

После преобразования имеем:

$$F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_w^2}{4} + \pi \left[\frac{1}{4} (d_w^2 - d_2^2) + \sqrt{d_w^2 - d_2^2} \cdot \Delta l + \Delta l^2 \right]. \quad (10)$$

Выражение, связывающее величину измерительного давления воздуха и конструктивные параметры преобразователя при $(\alpha_1 / \alpha_2)^2 \approx 1$ согласно формулы (1) имеет вид:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2}, \quad (11)$$

где $F_1 = \pi d_1^2 / 4$ – площадь поперечного сечения входного сопла.

После подстановки F_1 и F_2 в (11) получим:

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_w^2}{4} + \pi \left[\frac{1}{4} (d_w^2 - d_2^2) + \sqrt{d_w^2 - d_2^2} \cdot \Delta l + \Delta l^2 \right]}{\frac{\pi d_1^2}{4}} \right)^2}. \quad (12)$$

Выражение (12) описывает статическую характеристику первичного пневматического преобразователя шарикового типа – зависимость измерительного давления от конструктивных параметров шарикового сопла.

Моделирование статических характеристик первичных пневматических преобразователей со сферической заслонкой проводилось при следующих сочетаниях конструктивных параметров (таблица 1).

Таблица 1. – Конструктивные параметры пневматических преобразователей

Рабочее давление воздуха H , МПа	0,1; 0,15; 0,2
Диаметр входного сопла d_1 , мм	0,6; 0,8; 1,0; 1,5
Диаметр шарика d_w , мм	5
Диаметр отверстия d_2 , мм	4,5

В таблице 2 представлены результаты расчета статических характеристик сопла со сферической заслонкой при рабочем давлении воздуха $H=0,1$ МПа и диаметрах входных сопел $d_1=0,6; 0,8; 1,0$ и $1,5$ мм, а на **Рис.2** – графические зависимости $h = f(\Delta l)$ измерительного давления воздуха от перемещения шарика.

Таблица 2. – Результаты расчета статических характеристик

Величина вертикального перемещения шарика Δl , мм	Измерительное давление h , МПа при диаметре входного сопла d_1 , мм			
	0,6	0,8	1,0	1,5
0,01	0,081	0,093	0,097	0,099
0,05	0,014	0,035	0,057	0,086
0,1	0,004	0,011	0,024	0,061
0,2	0,00097	0,0030	0,007	0,027
0,5	0,000138	0,0004	0,0010	0,0051
1	0,000028	0,00009	0,00021	0,0011

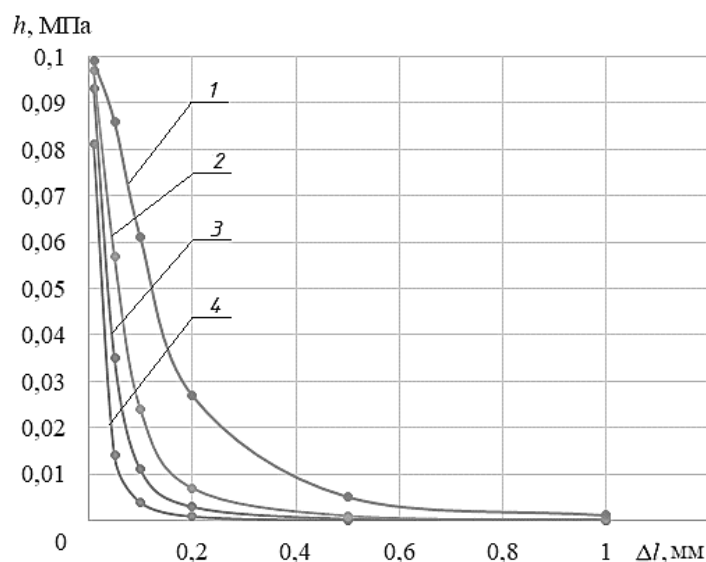


Рис.2 – Статические характеристики $h = f(\Delta l)$ сопла со сферической заслонкой при $h = 0,1$ МПа и различных значениях диаметра входного сопла d_1 :

1 – 0,6 мм; 2 – 0,8 мм; 3 – 1,0 мм; 4 – 1,5 мм

По результатам моделирования статических характеристик $h = f(\Delta l)$ определены прямолинейные участки Δl_i и чувствительности $K_i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$ при давлениях воздуха $H = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа и диаметрах входных сопел $d_1 = 0,6; 0,8; 1,0; 1,5$ мм (таблица 3).

На **Рис.3** показаны зависимости чувствительности преобразователя от диаметров входных сопел d_1 при рабочих давлениях воздуха $H = 0,1; 0,15; 0,2$ МПа.

На **Рис.4** показаны зависимости диапазона измерения преобразователя с

соплом шарикового типа от диаметров входных сопел $D_i = f(d_1)$ при различных давлениях воздуха.

Таблица 3. – Значения D_i и K_i

d_1 , мм	H , МПа	D_i , мм	Δh , МПа	Чувствительность $K_i, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$
0,6	0,1	0,035	0,067	1,92
	0,15	0,045	0,101	2,52
	0,2	0,052	0,135	2,61
0,8	0,1	0,065	0,080	1,23
	0,15	0,070	0,106	1,47
	0,2	0,080	0,159	1,98
1,0	0,1	0,080	0,073	0,91
	0,15	0,090	0,109	1,21
	0,2	0,120	0,163	1,36
1,5	0,1	0,190	0,072	0,37
	0,15	0,210	0,113	0,59
	0,2	0,220	0,152	0,69

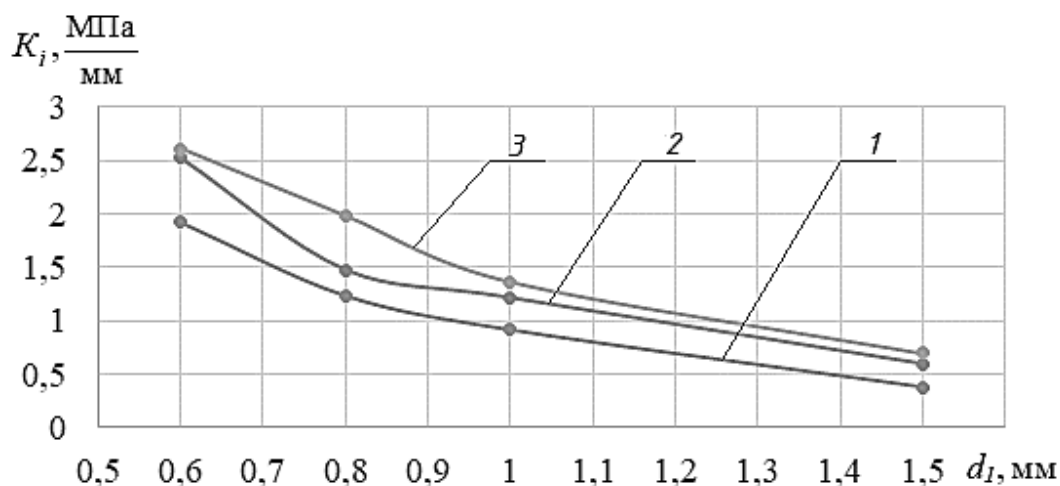


Рис.3 – Зависимость $K = f(d_1)$ чувствительности преобразователя от диаметра входного сопла d_1 при различных величинах рабочего давления

H :

1 – 0,1 МПа; 2 – 0,15 МПа; 3 – 0,2 МПа

В таблице 4 представлены числовые значения диапазонов измерения и чувствительности пневматических преобразователей со сферической и плоской

заслонками, позволяющие провести сравнительную оценку их метрологических характеристик.

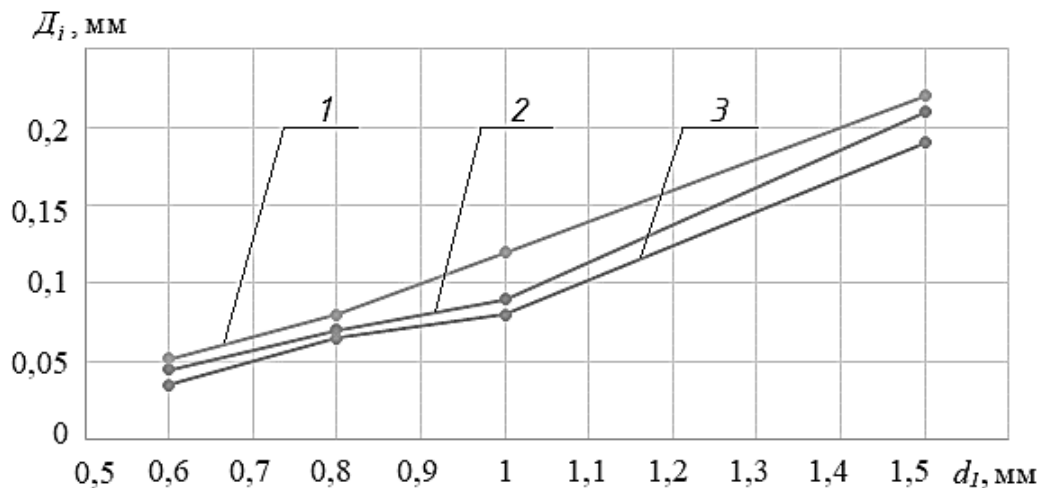


Рис.4 – Зависимость диапазона измерения $D_i = f(d_1)$ от диаметра входного сопла d_1 при различных величинах рабочего давления H : 1 – 0,1 МПа; 2 – 0,15 МПа; 3 – 0,2 МПа

Таблица 4. – Значения диапазонов измерения и чувствительности преобразователей со сферической и плоской заслонками

H , Мпа	d_1 , мм	Сферическая заслонка		Плоская заслонка	
		D_i , мм	K_i , МПа/мм	D_i , мм	K_i , Мпа/мм
0,1	0,6	0,035	1,62	0,036	1,25
	1,0	0,080	0,91	0,06	0,38
	1,5	0,190	0,37	0,14	0,133
0,15	0,6	0,045	2,52	0,036	1,67
	1,0	0,090	1,21	0,068	0,44
	1,5	0,210	0,59	0,140	0,196
0,2	0,6	0,052	2,61	0,046	1,97
	1,0	0,120	1,36	0,105	0,6
	1,5	0,220	0,69	0,140	0,251

Сравнительная оценка значений прямолинейных участков D статических характеристик и чувствительности K первичных пневматических преобразователей со сферической и плоской заслонками показывает, что диапазон измерения исследуемого преобразователя выше на 40...60%, чем у преобразователей с плоской заслонкой и составляет 0,035...0,22 мм, а

чувствительность K выше более чем в 2 раза и лежит в пределах 0,69...1,62 Мпа/мм.

Библиографический список

1. Автоматизация измерений, контроля и испытаний: Учебное пособие / М.Г. Шалыгин, Я.А. Вавилин.: – СПб.: Издательство «Лань», 2022. – 172 с.: ил.
2. Сырямский В.И. Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учебное пособие для вузов / В.И. Сырямский. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 532 с.
3. Китов, Б. И. Физические основы получения информации: учебное пособие: в 3 частях / Б. И. Китов. – Иркутск: ИрГУПС, 2019 – Часть 2: Датчики информации – 2019. – 96 с.
4. Физические основы получения информации: Учебное пособие / Б.Ю. Каплан. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 286 с.
5. Легаев, В. П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В. П. Легаев; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с. ISBN 978-5-89368-980-8.
6. Этингоф М. И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках: / М. И. Этингоф – М.: АПР, 2016. – 336 с.
7. 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.
8. Педь Е.И. Активный контроль в машиностроении/ Е.И. Педь. – М.: Изд-во Машиностроение, 1991. – 359 с.
9. Волосов С.С. Приборы автоматического контроля в машиностроении/ С.С.Волосов, Е.И. Педь – М.: Изд-во Машиностроение, 1970. – 310 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Avtomatizaciya izmerenij, kontrolya i ispy`tanij: Uchebnoe posobie / M.G. Shaly`gin, Ya.A. Vavilin.: – SPb.: Izdatel`stvo «Lan`», 2022. – 172 s.: il.
2. Sy`ryamskin V.I. Informacionny`e ustrojstva i sistemy` v robototexnike i mexatronike: uchebnoe posobie dlya vuzov / V.I. Sy`ryamskin. – 3-e izd., ster. – Sankt-Peterburg: Lan`, 2023. – 532 s.
3. Kitov, B. I. Fizicheskie osnovy` polucheniya informacii: uchebnoe posobie: v 3 chastyax / B. I. Kitov. – Irkutsk: IrGUPS, 2019 – Chast` 2: Datchiki informacii – 2019. – 96 s.
4. Fizicheskie osnovy` polucheniya informacii: Uchebnoe posobie / B.Yu. Kaplan. – M.: NICz INFRA-M, 2014. – 286 s.
5. Legaev, V. P. Pribory` avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v

mashinostroenii: ucheb. posobie / V. P. Legaev; Vladim. gos. un-t. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2009. – 123 s. ISBN 978-5-89368-980-8.

6. E`tingof M. I. Avtomaticheskij razmerny`j kontrol` na metallorazhushhix stankax: / M. I. E`tingof – M.: APR, 2016. – 336 s.

7. Avtomatizaciya v promy`shlennosti: praktikum: uchebnoe posobie dlya studentov vtuzov / E. V. Pashkov i dr.; red. E. V. Pashkov. - Sevastopol`: Izdatel'stvo Sevastopol'skogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta, 2010. - 224 s.: il. ISBN 978-966-2960-79-2.

8. Ped` E.I. Aktivny`j kontrol` v mashinostroenii/ E.I. Ped`. – M.: Izd-vo Mashinostroenie, 1991. – 359 s.

9. Volosov S.S. Pribory` avtomaticheskogo kontrolya v mashinostroenii/ S.S.Volosov, E.I. Ped` – M.: Izd-vo Mashinostroenie, 1970. – 310 s.

¹Васютенко Александр Павлович, к.т.н., доцент, доцент, APVasyutenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

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

INVESTIGATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC CONVERTERS WITH SPHERICAL FLAP

A.P. Vasyutenko, N.A. Balakina

Schemes of primary pneumatic transducers for linear measurements, their advantages and disadvantages are considered. The derivation of the formula for the static characteristics of a converter with a spherical flap and the results of modeling its characteristics for various combinations of initial parameters are given. Based on the analysis of static characteristics, the values of rectilinear sections and sensitivity are determined. A comparative assessment of the metrological characteristics of pneumatic converters with spherical and flat dampers has been carried out.

Keywords: measurement, transducer, pneumatics, nozzle-flap, sensitivity, error, measuring range.

Vasyutenko Alexander Pavlovich, candidate of technical sciences, docent, docent, APVasyutenko@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Balakina Natalya Anatolyevna, senior lecturer, NABalakina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Николенко И.В.¹, Мовчан С.И.²

Аннотация. Рассматриваются компьютерное моделирование движения частиц примесей водных растворов, с использованием программы MathCAD, получения формы доплеровского сигнала для различных параметров (характеристик) лазерной оптической измерительной установки: диаметр светового пучка, коэффициент, интенсивности доплеровского сигнала, начальная фаза, напряжённость электрокинетического поля и характеристик движения частиц: эффективный диаметр, электрокинетический дзета-потенциал примесей водного потока. По полученным результатам моделирования (по виду доплеровского сигнала, заданным параметрам и характеристикам измерительной установки) получаем характеристики (параметры) движения частиц – электрофоретическая скорость, смещение от вертикальной оси координат, период доплеровского сигнала; время нарастания, одинаковой формы и уменьшения амплитуды доплеровского, период доплеровского сигнала, которые выводятся на экран монитора персонального компьютера и печать.

Ключевые слова. Доплеровский сигнал, измерительная установка, световой пучок, электрокинетическое поле, частички примесей, эффективный диаметр, электрокинетический дзета-потенциал, водный поток

Введение.

Главной задачей технологических систем очистки природных и сточных вод является обеспечение потребителей водой, удовлетворяющей всем требованиям нормативных документов по качеству. Для автоматизации технологических процессов очистки природных и сточных вод от различных ингредиентов необходимо выполнять контроль параметров частиц примесей воды, водных растворов и сточных вод [7]. Качество и оперативность контроля этих параметров позволяют интенсифицировать процессы обработки и очистки природных и сточных вод за счет применения адаптивных систем регулирования параметрами технологических процессов.

При разработке, проектировании и эксплуатации локальных схем очистки производственных сточных вод важное место имеют технологии контроля качества очистки и измерения параметров частиц примесей. Методы лазерной, доплеровской интерферометрии обеспечивают определение скорости, эффективного диаметра, электрокинетического потенциала и концентрации

частиц примесей водных растворов дистанционно, в реальном времени с достаточно высокой точностью.

Постановка задачи в общем виде.

Оптические методы лазерной доплеровской интерферометрии позволяют определять скорость движения частиц, находящихся в водных растворах: электрокинетический дзета-потенциал, электрофоретическая скорость и линейный размер (эффективный диаметр) [1].

В процессах подготовки воды для питьевого водоснабжения, так и в оценке качества очистки сточных вод широко используются приборы, действие которых основано на поглощении (отражении) или прохождении направленного светового потока.

Основными оптическими эффектами, вызывающими в жидкостях механическое воздействие, являются изменение оптической плотности (коэффициента пропускания), угла поворота плоскости поляризации, коэффициентов рассеивания и отражения, показателя преломления, волнового сопротивления и коэффициента распространения, возникновение двойного лучепреломления при течении жидкости (эффект Максвелла) [1].

При выборе методов технического анализа учитывают требования, предъявляемые производством к точности результатов и скорости проведения анализа [2]. Иногда, последний фактор является определяющим, не только к оборудованию контроля, но и к работе всей системы оборотного водоснабжения. Обусловлено это использованием методов контроля, которые дают возможность получать точные результаты и корректировать процессы системы водоснабжения с максимальной точностью.

Приборы, действие которых основано на поглощении света суспензиями, носят название турбидиметров, с помощью которых определяют качество питьевой воды. Для устранения влияния окраски природной воды на результат измерений в таких мутномерах обычно устанавливают красный светофильтр с длиной волны $\lambda_{\text{макс.}} \approx 650 \text{ нм}$, при этих длинах волн оптическая плотность водных растворов невелика [3].

Ограниченность использования приборов данной конструкции обусловлена сложностью конструктивной схемы. Измерение количества частиц происходит в исследуемом объеме, что вносит определённую погрешность измерения и на конечный результат. Кроме того, ограниченность функционального исполнения ограничивает возможности приборов данного типа.

Приборы, в которых для контроля мутности среды используется измерение рассеянного света, носят название тиндалеметров или нефелометров. Их применение практически исключает влияние окраски природных вод на результаты измерений, а также обеспечивает возможность осуществлять оценку

средней дисперсности взвешенных веществ, применяя монохроматическое освещение. Обычно для определения концентрации очень разбавленных суспензий рекомендуется использовать тиндалемеры, а более концентрированных – турбидиметры [3].

Условия, которыми обусловлено применение данных приборов, связаны с использованием специального освещения, что суживает измерение данными приборами только для воды питьевого водоснабжения.

Кратковременные вспышки рассеянного света используются для счёта взвешенных частиц в поточно – ультрамикроскопическом методе, предложенном Дерягиным и Васенковым. Это достигается за счёт фокусирования лучей от источника света в центре внутреннего канала кюветы. Исследуемая жидкость с концентрацией взвешенных частиц от 10^2 до 10^8 в 1 см^3 и размерами их не менее $0,1 \text{ мкм}$ протекает ламинарным потоком через внутреннюю трубку и, дойдя до прозрачной стенки, меняет направление движения [4].

Для измерения параметров частиц необходимо, чтобы в исследуемой зоне имел место ламинарный режим движения. А это, в свою очередь, увеличивает погрешность измерения, вследствие работы водоочистного оборудования при разной гидравлической нагрузке.

Кроме того, конструктивно предусмотрено, чтобы в момент пересечения освещаемой зоны на тёмном фоне наблюдались яркие вспышки рассеянного света, что позволяет определять количество частиц, а не их форму и размеры.

В практике очистки природных и сточных вод применяется метод определения суммарного содержания электролитов (растворённых солей, кислот и оснований) по общей удельной электрической проводимости воды с помощью приборов – кондуктометров [5].

Использование оптического моделирования используется при исследовании очень сложных жидких растворов, какими являются ил в аэротенках биологической обработки бытовых стоков [6].

Ограниченность мировых запасов пресной воды стремительно превращает ее в дефицитный природный ресурс. Недостаток энергоресурсов, а также проблемы охраны окружающей среды делают вопросы, которые связаны с водопользованием особо актуальными. Это обуславливает требования к совершенствованию технологии производства промышленных предприятий с созданием оборотных циклов водоснабжения, регенерацией ценных компонентов, прекращения либо снижения отрицательного воздействия на окружающую среду, что обеспечивает снижение дефицита водных ресурсов. Внедрение технологических схем бессточных и безотходных производств требует решения комплекса задач по обеспечению высокой степени очистки природных и сточных вод, с учетом оптимальной увязки экологических и

экономических показателей. Традиционные способы очистки воды – механические, химические или реагентные – не обеспечивают в большинстве случаев необходимую эффективность очистки. Более высокая степень очистки природных и сточных вод можно достичь с помощью современных мембранных методов разделения (электродиализ, обратный осмос, ультрафильтрация, микрофильтрация и нанофильтрация). Эти методы позволяют очищать воду от солей, органических веществ, коллоидов и взвесей. Параметры мембранных методов по давлению и возможности задержания различных ингредиентов приведены на **Рис.1** [7].



Рис.1 – Параметры мембранных методов по давлению и возможности задержания различных ингредиентов загрязнений жидкости

Согласно теории электрофореза, разработанной Смолуховским и Гюккелем [12], движение частицы в электрическом поле рассматривается как результат действия на ее поверхностный заряд силы Кулона со стороны электрического поля и силы вязкости в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости: силе тяготения и вязкости и силы Архимеда. Такое расположение сил и их действие, по соответствующим направлениям, стало основой проведенных исследований, учитывающих сумму сил в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{cases} \vec{F}_k + \vec{F}_c = 0 \\ \vec{F}_m + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0. \end{cases} \quad (1)$$

С учетом выше обозначенных сил, действующих в горизонтальной и вертикальной плоскостях, имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_K = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r\xi E = 6\pi r\eta V_\Gamma = F_c, \\ \vec{F} = m\vec{g} = \rho V\vec{g} = \rho \frac{4}{3}\pi \frac{D^3}{8} \vec{g} = \frac{1}{6}\pi D^3 \rho \vec{g}, \\ \vec{F}_A = -m_1\vec{g} = -\rho_1 V\vec{g} = -\frac{1}{6}\pi D^3 \rho_1 \vec{g}, \\ \vec{F}_c = -6\pi \frac{D}{2} \eta \vec{V}_B. \end{array} \right. \quad (2)$$

Расположение сил, действующих на каждую отдельную частицу в процессе электрофореза и седиментации, в вертикальной и горизонтальной плоскостях по действию вертикальной и горизонтальной составляющих, приведена на **Рис.2**.

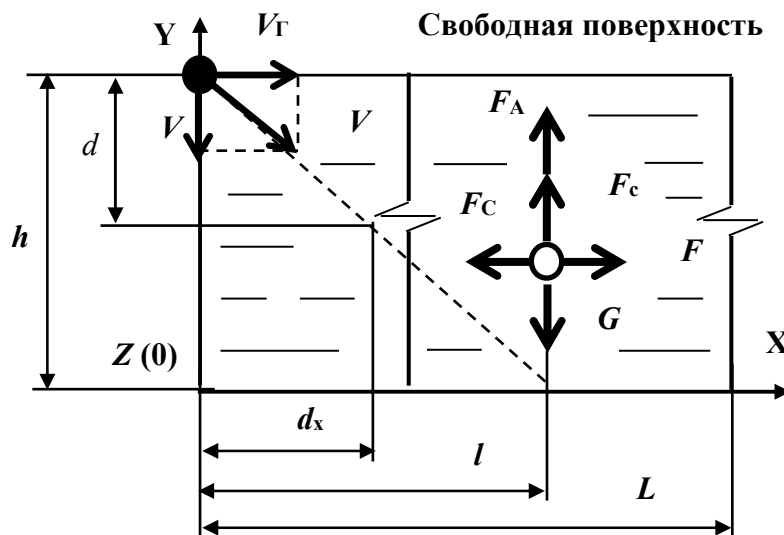


Рис.2 – Диаграмма сил, действующих на свободно осаждаемую частицу и движущуюся в жидкой среде: F_A - выталкивающая сила или сила Архимеда; F_c - сила сопротивления, которая уравнивает силу тяжести G ; G - сила тяжести; F_K - сила Кулона, действующая на заряженную частицу; F_c - сила Стокса (вязкости)

Из анализа представленной на **Рис.2** диаграммы действующих сил следует, что движение каждой частицы потока жидкости, определение её составляющих в горизонтальной и вертикальной плоскостях является трудозатратным процессом.

С учётом действия вертикальной и горизонтальной составляющих, в процессе электрофореза и седиментации, необходимо учитывать энергетическую эффективность процессов очистки. Теоретическими

предпосылками, для проведения исследований и определения гидродинамических характеристик и параметров движения частиц примесей сточных вод и водных растворов, являются: уравнения материального и энергетических балансов, позволяющими производить качественный анализ размера частиц загрязнений и параметров оптико-механических систем.

Поэтому, повышение степени эффективности и точности определения гидродинамических параметров и характеристик частиц примесей водных растворов, решает водохозяйственную проблему, направленную на повышение эффективности работы систем оборотного водоснабжения, в части контроля и управления процессами автоматизации технологии очистки/обработки сточных вод промышленных предприятий.

Цель и задачи исследований.

Основной целью исследований является компьютерного моделирования гидродинамических параметров частиц примесей водных растворов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

1. С использованием дифференциальной оптической схемы лазерного доплеровского анемометра определить форму сигнала в различных световых ракурсах, движения частиц примесей водного раствора.

2. С помощью разработанного алгоритма, математического расчёта и современных средств измерения и автоматизации, оптимизировать форму доплеровского сигнала

Основная часть.

К области экологических исследований помимо прямых средств и технологических мер необходимо отнести косвенные методы, позволяющие определять отдельные параметры или комплекс гидромеханических параметров. Известные ранее оптические способы определения параметров частиц водных растворов не полностью соответствовали поставленной задаче. Поэтому в объеме выполнения исследований, связанных с методикой расчета гидромеханических параметров частиц в зависимости от формы доплеровского сигнала, предложено математическое моделирование процесса измерения и анализа полученных экспериментальных результатов.

Методика определения доплеровского сигнала

Интенсивность доплеровского сигнала в первом приближении имеет следующую зависимость от времени и определяется по формуле:

$$I(t) = I_1(t) \sin(2\pi\nu_d t + \phi), \quad (3)$$

где $\nu_D = \frac{1}{T_D} = \frac{2Vn}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2}$ – частота доплеровского сигнала, Гц; $\frac{\alpha}{2} = \Theta_1 = \Theta_2$ – угол возрастания доплеровского сигнала, град; φ – начальная фаза; n – показатель преломления жидкости, $n = 1,33$; T_D – период доплеровского сигнала, с.

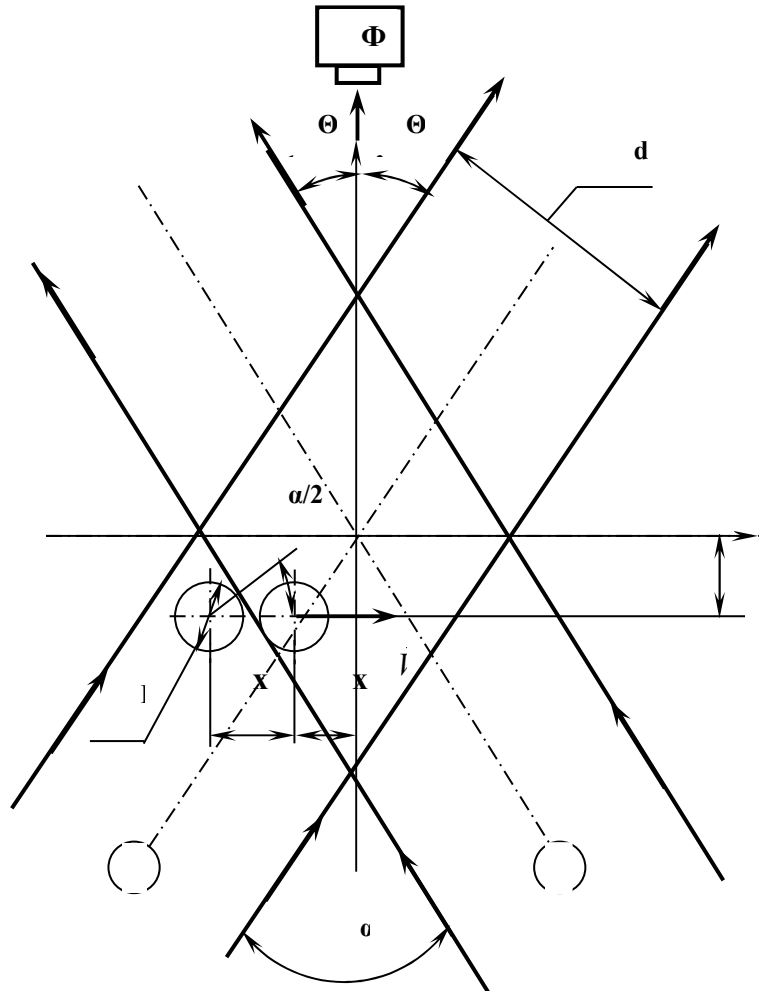


Рис.3 – Образование зондируемой зоны для получения доплеровского сигнала: $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta = \alpha/2$ – угол рассеивания; α – угол двумя между зондирующими когерентными пучками, град.; d – диаметр лазерных пучков, м; ФЭУ – фотоэлектрическое устройство.

Определив пределы интенсивности доплеровского сигнала и подставив их к уравнению (1) получим систему уравнения, определяемую по формуле:

$$I_1(t) = \begin{cases} at & npi & 0 \leq t \leq t_1 = \frac{D}{V \cos \alpha/2} \\ 1 & npi & t_1 < t \leq t_3 = \frac{(D+d) + (d-D)J}{2V \cos \alpha/2} \end{cases}, \quad (4)$$

где a – коэффициент, $a = \frac{V \cos \alpha/2}{D} = \frac{1}{t_1}$; $t_3 = \frac{\tau}{2}$ – половина возрастания доплеровского сигнала ($t_3 = t_1 + t_2$), с; D – диаметр частицы, м; t_1 – продолжительность возрастания амплитуды доплеровского сигнала, с; d – диаметр гаусового пучка, м; $t_3 = \frac{\tau}{2}$ – половина длительности доплеровского сигнала, с; $j = 0...1$ – параметр, который определяет положение частицы относительно горизонтальной оси симметрии зондируемой зоны (**Рис.2**).

Параметр $j = 0...1$ определяет положение частицы относительно горизонтальной оси симметрии ОХ (рис. 2):

$$y = \frac{(d-D)}{2 \cdot \sin \alpha/2} \cdot J. \quad (5)$$

Зондируемая зона для получения доплеровского сигнала получается на пересечении двух пучков 1 и 2, которые освещают частицу с двух сторон. Такое освещение каждой частицы получается с использованием конструкции электромеханического модулятора [10],

Методика обработки полученного доплеровского сигнала

В работах [8,9], в технологии контроля качества очистки сточных вод гальванического производства, используется метод лазерной доплеровской интерферометрии лазерный доплеровский метод измерения параметров частиц при электрофорезе. Разработанные оптические схемы лазерной доплеровской интерферометрии на основании эффекта Доплера и применения призмы Довэ определяют скорость движения частиц водных растворов в диапазоне $10^{-5}...10^2$ м/с, эффективный диаметр находится в пределах 10...500 мкс. При этом расстояние до объекта исследований составляет 10...1000 мм, а размеры зондирующей зоны определяются выбранной схемой измерения, когда ее средняя величина составляет 0,01...1,0 мм.

На **Рис.4** приведена форма доплеровского сигнала (фотография с экрана осциллографа С 9 - 8), которая представлена в двух вариантах на белом и чёрном фоне.

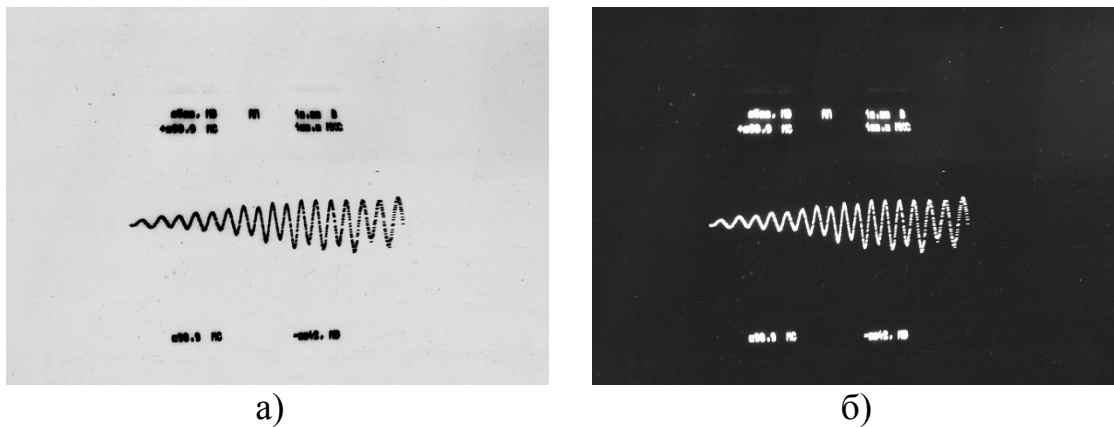


Рис.4 - Форма доплеровского сигнала (фотография с экрана осциллографа С 9 - 8): а – белый фон; б – тёмный фон

Примечание. Для лучшей восприятия картинки получения определяемых параметров с экрана осциллографа – фото повернуто, чтобы восприятия происходило слева на право.

Время увеличения амплитуды доплеровского сигнала t_1 определяется продолжительностью движения частицы в граничной зоне, когда поверхность частицы двумя пучками освещена не полностью:

$$t_1 = \frac{x_1}{V} = \frac{D}{V \cos \alpha/2}. \quad (6)$$

Время t_{max} максимального значения амплитуды доплеровского сигнала t_2 определяется движением частицы в осветлённой зоне пересечения двух лазерных пучков и зависит от положения частицы $y = j y_{max}$ относительно горизонтальной оси симметрии ОХ:

$$t_{max} = \frac{(d - D)}{2v \cos \alpha/2} (1 - J). \quad (7)$$

Тогда продолжительность доплеровского сигнала равна:

$$\tau = 2t_3 = 2(t_1 + t_2). \quad (8)$$

Для определения электрофоретической скорости движения частицы измеряем период $T_D = 1/\nu_D$ доплеровского сигнала, определяемого по формуле:

$$v = \frac{\lambda \nu_D}{2n \sin \alpha/2} = \frac{\lambda}{2T_D n \sin \alpha/2}. \quad (9)$$

Поскольку форма доплеровского сигнала симметрична, формула (3) определяет величину сигнала для первой его половины (**Рис.5**).

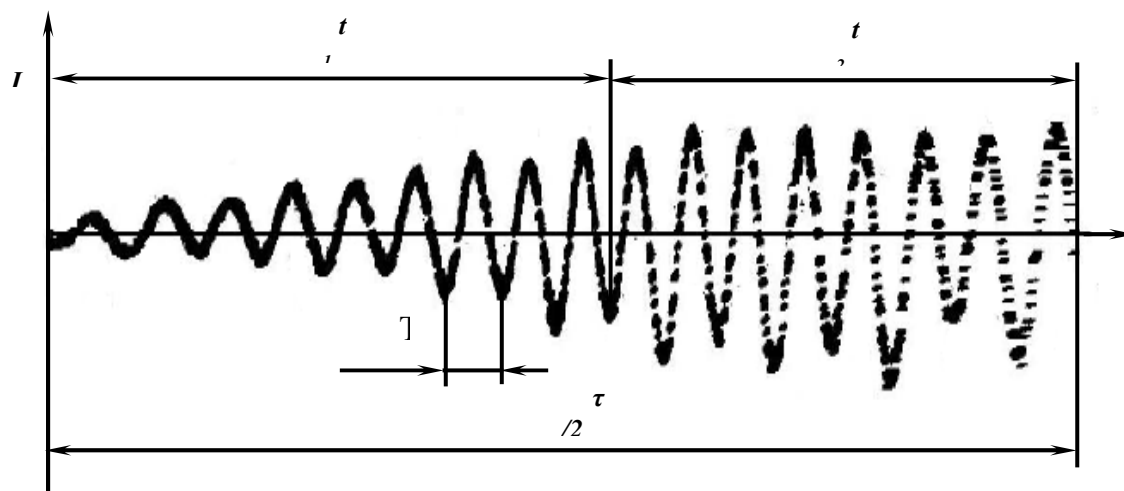


Рис.5 - Форма доплеровского сигнала (фотография с экрана осциллографа С 9 - 8): $T_D = 13$ мс – период доплеровского сигнала; $t_1 = 135$ мс – время возрастание амплитуды доплеровского

Для определения диаметра частицы D необходимо измерить время t_1 роста интенсивности доплеровского сигнала. Тогда с учетом гауссового распределения интенсивности излучения по сечению зондирующего луча эффективный диаметр определяется по формуле:

$$D = t_1 v \cos \frac{\alpha}{2} - 0,1d. \quad (10)$$

Величина электрокинетического дзета–потенциала ξ определяется по формуле Смолуховского:

$$\xi = \frac{3\eta v}{2\varepsilon\varepsilon_0 E}. \quad (11)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; η – вязкость жидкости; E - напряженность электрического поля.

Детальный анализ зависимости формы доплеровского сигнала от параметров измерительной установки позволяет выбрать значение угла α между двумя зондирующими пучками и диаметром d гауссовых пучков, а также разработать алгоритм решения обратной задачи – по виду доплеровского сигнала определить скорость и размер (например, диаметр) частиц дисперсной фазы. Первая половина доплеровского сигнала разбивается на k дискретных интервалов и для каждого значения $t_i = \frac{t}{k} \cdot i$ ($i = 0, 1 \dots k$) вычисляется величина сигнала $I_i = I(t_i)$. Разработанная программа позволяет получить форму сигнала $I(t)$ для различных параметров установки: d , α , φ , E и

параметров частицы: D , ζ . Вид сигнала, задаваемые параметры, характеристики движения частицы (V , y) и доплеровского сигнала (ν_D , T_D , t_1 , t_2 , t_3 , τ_{max}), а также относительные погрешности вычислений выводятся на экран монитора и печать (Рис.6).

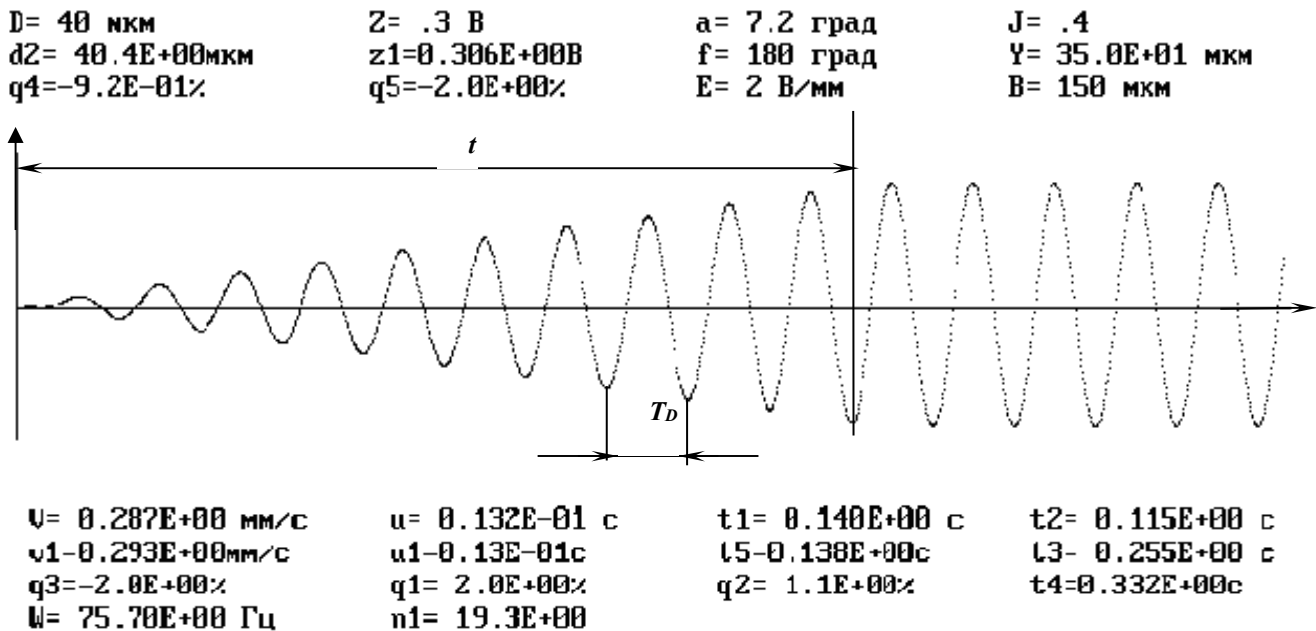


Рис.6 – Форма доплеровского сигнала, которая получена в результате теоретического расчёта движения частицы с помощью вычислительной техники: вверху наведены параметры, которые задаются, а внизу – выходные параметры в случае обработки сигнал

Разработано алгоритм и программа математического расчёта [10,11], с использованием вычислительной техники формы доплеровского сигнала с выхода фотоприёмника интерферометра. Эта программа позволяет получить форму сигнала $I(t)$ для разных параметров установки: d , α , φ , E (напряжённость электрического поля) и параметров частиц: D , ζ (электрокинетический дзета-потенциал). Вид сигнала, заданные параметры характеристики движения частицы: V , y и доплеровского сигнала: ν_D , T_D , t_1 , t_2 , t_3 , τ_{max} выводятся на экран монитора и печать (Рис.5).

В работе [1] автором сделан вывод, что применение оптоэлектронных элементов и приборов на их основе в лабораторном приборостроении пока не вышла из стадии экспериментальных исследований и требует постоянного совершенствования.

Таким образом, анализ параметров и формы доплеровского сигнала с выхода лазерного интерферометра позволяет провести математическое

моделирование и автоматизировать процесс измерения гидромеханических параметров частиц примесей.

Выводы.

Разработанная программа математического моделирования процесса измерения гидромеханических и физических параметров частиц методом лазерной доплеровской интерферометрии позволяет оценить относительные погрешности определения параметров частиц примесей. Максимально допустимая погрешность алгоритма решения обратной задачи для определения диаметра частицы выбирается равной 6 %. Тогда минимальный диаметр частицы при следующих выбранных параметрах установки $d=0,1$ мм, $a=8$ и $E=2$ В/мм равен $D_{\min}=7,5$ мкм. Минимальное значение дзета-потенциала при этих же параметрах измерительной установки и допустимой относительной погрешности измерений в случае, когда минимально допустимая частота доплеровского сигнала $\nu_D, \min = 1$ Гц и напряженность электрического поля $E = 10$ В/мм, будет равно $x_{\min} = 0,8$ мВ [10].

Разработанные алгоритм и программа Speed 01 [9] моделирования формы доплеровского сигнала с выхода ФЭУ лазерного интерферометра позволяют автоматизировать процесс измерения оптимальных параметров разработанной оптической схемы.

Библиографический список

1. Андреев В.С. Лабораторные исследования жидких сред. / В.С. Андреев, Е.П. Попечителей. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 312 с.
2. Бородулина Е.К. Технический анализ и контроль электрохимических производств неорганических веществ / Е.К. Бородулина, С.С. Шрайбан. – М.: Химия, 1973. – 208 с.
3. Гороновский И.Т. Физико–химическое обоснование автоматизации технологических процессов обработки сточных вод / И.Т. Гороновский. – К.: Наукова думка, 1975. – 213 с.
4. Смирнов Д.Н. Автоматическое регулирование процессов очистки природных и сточных вод / Д.Н. Смирнов. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 312 с.
5. Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. Изд. 3 – е перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1977. – 299 с.
6. Сайт Петрова Е.Э. Моделирование оптической части электронной системы контроля индекса ила в аэротенке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/fkita/petrova/library/article8.htm>

7. Гогина Е.С. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения: Справочное пособие / Е.С. Гогина, А.Д. Гуринович, Е.А. Урецкий. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 312 с.
8. Мороз Н.В. Лазерный доплеровский метод измерения параметров частиц при электрофорезе / Н.В. Морозов, С.И. Мовчан // Вестник БГТУ, 2004. – Т. 3. Вип. 8. – С. 105-107.
9. Мороз Н.В. Технология контроля качества очистки сточных вод гальванического производства методом лазерной доплеровской интерферометрии / Н.В. Морозов, С.И. Мовчан // Науковий вісник будівництва. – 2008. – Вип. 47. – С. 245 - 249.
10. А. с. № 1804608 СССР, МКИ С 01 N 15/02. Способ определения скорости и размеров частиц в движущейся среде / Н.И. Бунин, Н.В. Морозов, В.В. Солодов. – № 4946914; Заявл. 17. 06. 91; Опубл. 23. 03. 93, Бюл. № 11.
11. Авторські права на твір. Свідоцтво № 67544 Оптико-механічні системи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № 68162. Від 04.07.2014 р. Дата реєстрації 02.09.2016 р.
12. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники / Ю.В. Байбородин. – К.: Выща школа, 1988. - 308 с.
13. Куликов Н.И. Теоретические основы очистки воды / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышёв. – Донецк: изд – во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. – 298 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Andreev V.S. Laboratornye issledovaniya zhidkih sred. / V.S. Andreev, E.P. Popechitelev. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1981. – 312 s.
2. Borodulina E.K. Tekhnicheskij analiz i kontrol' elektrohimicheskikh proizvodstv neorganicheskikh veshchestv / E.K. Borodullina, S.S. SHrajban. – M.: Himiya, 1973. – 208 s.
3. Goronovskij I.T. Fiziko–himicheskoe obosnovanie avtomatizacii tekhnologicheskikh processov obrabotki stochnyh vod / I.T. Goronovskij. K.; Naukova dumka, 1975. – 213 s.
4. Smirnov D.N. Avtomaticheskoe regulirovanie processov ochistki prirodnyh i stochnyh vod / D.N. Smirnov. – 2 – e izd., pererab. i dop. – M.: Strojizdat, 1985. – 312 s.
5. Metodika tekhnologicheskogo kontrolya raboty ochistnyh sooruzhenij gorodskoj kanalizacii. Izd. 3 – e pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1977. – 299 s.
6. Sajt Petrova E. E. Modelirovanie opticheskoy chasti elektronnoj sistemy kontrolya indeksa ila v aerotenke [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/fkita/petrova/library/article8.htm>

7. Gogina E.S. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya: Spravochnoe posobie / E.S. Gogina, A.D. Gurinovich, E.A. Ureckij. – M.: Izd-vo ASV, 2012. – 312 s.
8. Moroz N.V. Lazernyj doplerovskij metod izmereniya parametrov chastic pri elektroforeze / N.V. Morozov, S.I. Movchan // Vestnik BGTU, 2004. – T. 3. Vip. 8. – S. 105-107.
9. Moroz N.V. Tekhnologiya kontrolya kachestva ochistki stochnyh vod gal'vanicheskogo proizvodstva metodom lazernoj doplerovskoj interferometrii / N.V. Morozov, S.I. Movchan // Naukovij visnik budivnictva. Vip. 47, Harkiv, HDTUBA – HOTB, 2008. – S. 245 - 249.
10. A. s. № 1804608 SSSR, MKI S 01 N 15/02. Sposob opredeleniya skorosti i razмеров chastic v dvizhushchejsya srede / N.I. Bunin, N.V. Morozov, V.V. Solodov. – № 4946914; Zayavl. 17. 06. 91; Opubl. 23. 03. 93, Byul. № 11.
11. Avtors'ki prava na tvir. Svidoctvo № 67544 Optiko-mekhanichni sistemi viznachennya gidromekhanichnih parametriv chastinok vodnih rozchiniv [tekst]: / S.I. Movchan. Zayavka № 68162. Vid 04.07.2014 r. Data reestracii 02.09.2016 r.
12. Bajborodin YU.V. Osnovy lazernoj tekhniki / YU.V. Bajborodin. – K.: Vyshcha shkola, 1988. - 308 s.
13. Kulikov N.I. Teoreticheskie osnovy ochistki vody / N.I. Kulikov, A.YA. Najmanov, N.P. Omel'chenko, V.N. CHernyshyov. – Doneck: izd-vo «Noulidzh» (Doneckoe otделение), 2009. – 298 s.

¹*Николенко Илья Викторович д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, nikoshi@mail.ru, Россия, Симферополь, Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского*

²*Мовчан Сергей Иванович, к.т.н., доцент, movchantsaa@rambler.ru, Россия, Мелитополь, Мелитопольский государственный университет*

*COMPUTER MODELING AND STUDY OF HYDRODYNAMIC
PARAMETERS OF MOTION OF IMPURITY PARTICLES IN AQUEOUS
SOLUTIONS*

I.V. Nikolenko, S.I. Movchan

Computer modeling of the movement of particles of impurities in aqueous solutions, using the MathCAD program, is considered to obtain the shape of the Doppler signal for various parameters (characteristics) of a laser optical measuring device: diameter of the light beam, coefficient, Doppler signal intensity, initial phase, electrokinetic field strength and characteristics (parameters) particle motion: effective diameter, electrokinetic zeta potential of water flow impurities. According to

the obtained simulation results: according to the type of the Doppler signal, the given parameters and characteristics of the measuring installation, we obtain the characteristics (parameters) of particle motion: electrophoretic velocity, displacement from the vertical coordinate axis, period of the Doppler signal; the rise time, the same shape and decrease in the amplitude of the Doppler signal, the period of the Doppler signal, which are displayed on the screen of a personal computer monitor and printed.

Keywords: doppler signal, measuring setup, light beam, electrokinetic field, impurity particles, effective diameter, electrokinetic zeta potential, water flow

Nikolenko Ilya Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, nikoshi@mail.ru, Russia, Simferopol, Crimean Federal University IN AND. Vernadsky

Movchan Sergey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, movchantsaa@rambler.ru, Russia, Melitopol, Melitopol State University

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ КОНТРОЛЯ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

Мирзоян Н.Ю.¹, Заморёнов М.В.², Гета Д.А.³

Аннотация. Рассмотрены математические модели, описывающие влияние конструкции вихретокового преобразователя при вихретоковом контроле на вносимое напряжение. Представлены результаты моделирования и проведен их анализ, показавший возможность увеличения чувствительности вихретокового контроля за счет подбора конструкции.

Ключевые слова. Неразрушающий контроль, вихретоковый метод, магнитная проницаемость, вносимое напряжение, частота поля, компенсация, обмотка, катушка, сердечник.

К одному из видов неразрушающего контроля относится вихретоковый контроль. Вихретоковый преобразователь имеет различные виды и конструкции. По рабочему положению относительно объекта контроля преобразователи делят на проходные, накладные и комбинированные. Накладные ВТП обычно представляют собой одну и более катушек индуктивности, к торцам которых подводится контролируемая поверхность. Катушки таких преобразователей могут иметь различную форму: круглыми, осевыми, прямоугольными, крестообразными, с взаимно перпендикулярными осями и др. (Рис.1). Накладные преобразователи выполняют с ферромагнитными сердечниками и без них. Благодаря ферромагнитному сердечнику, в несколько раз повышается абсолютная чувствительность преобразователя и уменьшается зона контроля за счет изменения масштаба магнитного потока. Накладными ВТП контролируют, в основном, изделия с плоскими поверхностями и объекты сложной формы. Данные преобразователи применяют, также, когда требуется обеспечить высокую точность контроля [1,2].

Отличительная особенность проходных ВТП в том, что во время контроля они проходят либо снаружи объекта, либо внутри объекта, либо погружёнными в жидкий объект. Как правило, проходные ВТП имеют однородное магнитное поле в зоне контроля, в результате чего смещения объекта контроля не влияет на выходной сигнал. Для чего, длина возбуждающей обмотки катушки ВТП должна в 6–8 раз и более превышать ее радиус, а длина измерительной обмотки, размещенной в центре возбуждающей обмотки, должна быть значительно меньше длины возбуждающей обмотки. Однородное поле получают также, применяя соосные катушки одинакового

радиуса, и измерительную – в виде короткой катушки. Комбинированные ВТП представляют из себя смесь проходных и накладных измерительных обмоток. Данная конфигурация позволяет производить исследования контролируемого объема в более узкой зоне и имеет более чувствительна к мелким дефектам в сравнении с накладными и проходными преобразователями.

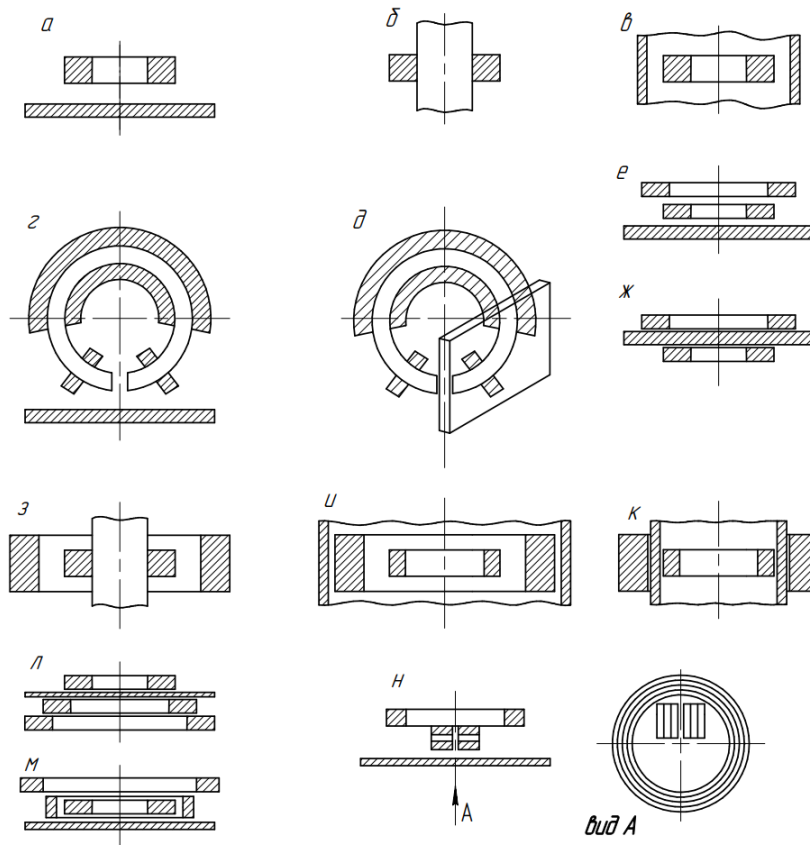


Рис.1 – Конструкции вихрековых преобразователей: а, б, в, г, д, е, ж – накладные ВП; з, и, к – проходные ВП; л, м, н – комбинированные ВП

1. Накладной вихрековый преобразователь с двумя обмотками

Накладной преобразователь с двумя обмотками представлен на **Рис.1, е**. Выражение ЭДС для данного преобразователя имеет вид [3,4]:

$$\xi = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} (34n - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e\left(-\frac{3c}{2R}\right) I - j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \times$$

$$\times (34n - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} e\left(-\frac{3|h_1 + h_2|}{2R}\right) \times I \times \varphi_1(\gamma),$$

где $\gamma = \frac{3}{2R}$, $n = \frac{R_2}{R_1}$, если $\frac{R_2}{R_1} \leq 1$ или $n = \frac{R_1}{R_2}$, если $\frac{R_1}{R_2} \leq 1$

I – ток в генераторной обмотке ВТП; μ_0 – магнитная постоянная; j – мнимая единица; W_1, W_2 – число витков измерительной и возбуждающей обмоток вихретокового преобразователя ($W_1 = 20$, $W_2 = 400$); R_1, R_2 – радиусы измерительной и возбуждающей обмоток ($R_2 = 15 \times 10^{-4}$ м, $R_1 = 5 \times 10^{-4}$ м); R – наибольшее из R_1, R_2 ; h_1 и h_2 – расстояния от возбуждающей и измерительной обмоток до поверхности объекта контроля, $c = |h_1 + h_2|$; $\varphi_1(\gamma)$ – функция, определяемая из граничных условий

$$\varphi_1(\gamma) = \frac{x - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{x + \sqrt{x^2 + j\beta^2}},$$

где $x = \gamma R_2$, $\gamma = \frac{3}{D_3}$, $\beta = D_3 \sqrt{\mu_0 \omega \sigma}$ – обобщенный параметр исследуемого объекта, $D_3 = D_1 + 1.5 \times h_1$ – диаметр контура максимальной плотности вихревых токов, где D_1 – диаметр генераторной обмотки, h_1 – расстояние от генераторной обмотки до исследуемого объекта.

Тогда напряжение, вносимое в измерительную обмотку будет равно:

$$U_{вн} = j \times U'_0 \times e(-3\xi) \times (\operatorname{Re}(\varphi_1(\gamma)) + j \times \operatorname{Im}(\varphi_1(\gamma))), \text{ где } \xi = \frac{h_1 + h_2}{D_3}$$

При учете характеристик сердечника и, как следствие, величины магнитной индукции, создаваемой им, можно записать:

$$U'_0 = 1.7 \times 10^{-6} \omega (m' - 0.3) \sqrt{D_1 D_2} W_1 W_2 \mu_0 \times I_{to} \sqrt{\frac{W - W_t V}{W}},$$

где $m' = 0.38$, μ_0 – начальная магнитная проницаемость, D_1, D_2 – диаметры генераторной и измерительной обмоток датчика, I_{to} – сила тока возбуждающей обмотки ($I_{to} = 3$ мА), $V = 0.094$ – объем сердечника, $W = 0.66$ – мощность источника, питающего токовую обмотку, W_t – магнитные потери

$$W_t = \frac{10^{-7}}{4} B_{\max}^2 f \frac{\operatorname{tg} \delta}{\mu}, \text{ где } \delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \sigma}}, B_{\max} = \mu_0 \mu_{\max} \frac{I_{to} W_2}{2R_2} = 2.89 \text{ Тл},$$

$$\mu_{\max} = 5 \times 10^2 \text{ Гн/м}.$$

Тогда вносимые напряжения будут иметь вид:

$$\operatorname{Re}(U_{вн}) = U_0' \times \exp(-3\xi) \times \operatorname{Im}(\varphi_1(\gamma));$$

$$\operatorname{Im}(U_{вн}) = U_0' \times \exp(-3\xi) \times \operatorname{Re}(\varphi_1(\gamma)).$$

Данные выражения используются для расчета тех напряжений, которые вносятся в измерительную обмотку сверхминиатюрного вихретокового преобразователя.

Действительные и мнимые компоненты абсолютного вносимого напряжения будут рассчитываться по формулам:

$$\operatorname{Re}(U_{вн}) = U_0' \times \exp(-3\xi) \times \operatorname{Re}(\varphi_1(\gamma));$$

$$\operatorname{Im}(U_{вн}) = U_0' \times \exp(-3\xi) \times \operatorname{Im}(\varphi_1(\gamma)).$$

В Таблице 1 представлены результаты расчетов напряжения для разных значений h_1 и h_2 при $f = 7000$ Гц; $\sigma = 58,2 \times 10^6$ См/м. По представленным в ней результатам построен график напряжения, **Рис.2**, вносимого в измерительную обмотку при разных значениях h_1 и h_2 .

Таблица 1. – Результаты расчетов напряжения для разных значениях h_1 и h_2

σ , МСм/м	62,5		
h_1 , мм	0,5	0,35	0,2
h_2 , мм	0,2	0,1	0,005
$\operatorname{Re}(U_{вн})$, мВ	11,73	11,03	10,24
$\operatorname{Im}(U_{вн})$, мВ	3,01	3,21	3,42

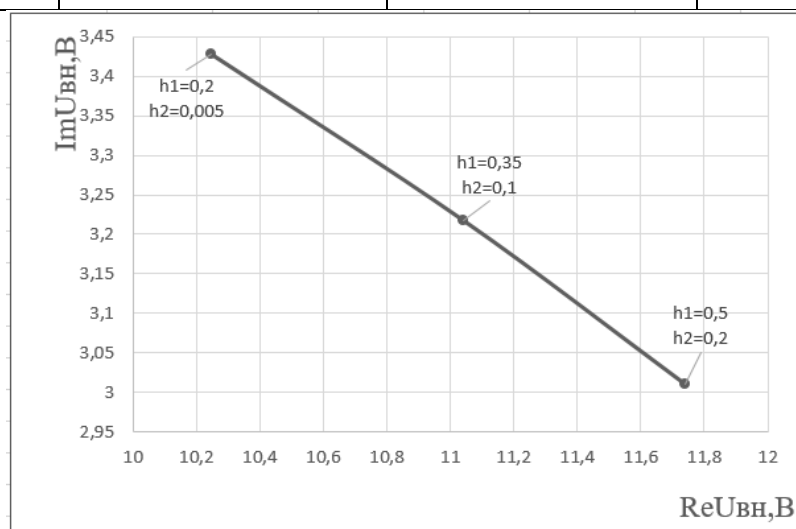


Рис.2 – График напряжения, вносимого в измерительную обмотку

Как следует из графика, **Рис.2**, с увеличением расстояний от возбуждающей и измерительной обмоток до поверхности объекта контроля уменьшается напряжение, что уменьшает качество проводимого контроля.

2. Накладной вихретоковый преобразователь с тремя обмотками

Рассмотрим плоский вихретоковый преобразователь с тремя обмотками (**Рис.3**): возбуждающей W_B , измерительной W_u , и компенсационной W_k , с объектом контроля (ОК). Катушки W_u и W_k идентичны по параметрам и включены последовательно встречно. Поэтому можно считать, что вносимое суммарное напряжение равно [5,6]:

$$U_{вн} = U_{вн2} - U_{вн3},$$

где $U_{вн2}$ – вносимое напряжение на измерительной катушке; $U_{вн3}$ – вносимое напряжение на компенсационной катушке. При отсутствии ОК вносимое напряжение равно нулю.

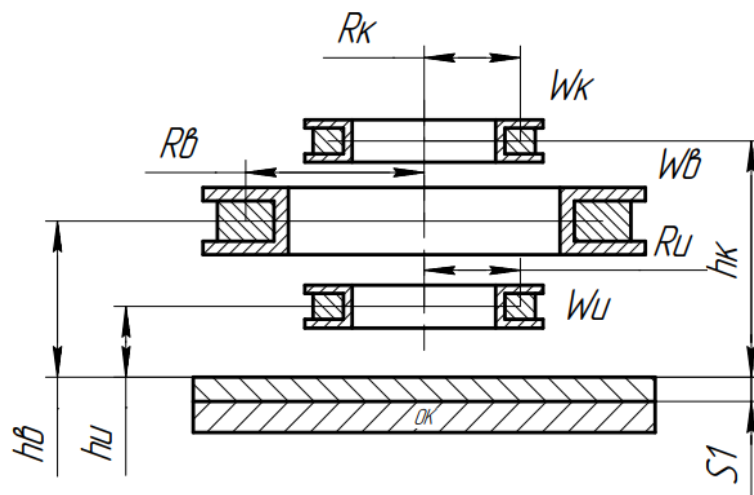


Рис.3 – Модель взаимодействия ВТП с ОК

Комплексное вносимое напряжение ВТП определяется по формуле:

$$U_{вн} = j \cdot \mu_0 \cdot W_B \cdot W_u \cdot \omega \cdot I \cdot R_1 \cdot \pi \cdot \int_0^\infty \varphi_{ок} \cdot e^{-xh1} \times J_1\left(x \cdot \frac{R_6}{R_u}\right) \times J_1\left(x \cdot \frac{R_u}{R_6}\right) dx -$$

$$- j \cdot \mu_0 \cdot W_6 \cdot W_k \cdot \omega \cdot I \cdot R_2 \cdot \pi \cdot \int_0^\infty \varphi_{ок} \cdot e^{-xh2} \times J_1\left(x \cdot \frac{R_6}{R_k}\right) \times J_1\left(x \cdot \frac{R_k}{R_6}\right) dx,$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; W_6, W_u, W_k – количество витков возбуждающей, измерительной и компенсационной катушки; ω – круговая частота; $R_1 = \sqrt{R_6 R_u}$, $R_2 = \sqrt{R_6 R_k}$ –

эквивалентный радиус ВТП; R_e, R_u, R_k – радиус возбуждающей, измерительной и компенсационной катушки; $h_1 = \frac{h_e + h_u}{R_1}, h_2 = \frac{h_e + h_k}{R_2}$ – обобщенный параметр, характеризующий расстояние между центрами обмоток ВТП и поверхностью ОК; h_e, h_u, h_k – расстояния от центра возбуждающей, измерительной и компенсационной катушки до поверхности объекта контроля; $J_1(x \cdot \frac{R_e}{R_u})$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Функция влияния ОК $\varphi_{ок}$ является наиболее важным параметром, который характеризует влияние параметров ОК на комплексное вносимое напряжение ВТП.

Контроль толщины проводящего покрытия (S_1) на проводящем основании является одним из наиболее сложных, так как приходится учитывать влияние множества параметров (частоту, магнитную проницаемость, электрическую проводимость, зазор и др.). Функцию влияния объекта контроля в этом случае можно определить по формуле:

$$\varphi_{ок} = \frac{(\mu_1 \cdot x - q_1) \cdot (\mu_2 \cdot q_1 + \mu_1 \cdot q_2) \cdot e^{T \cdot q_1} - (\mu_1 \cdot x + q_1) \cdot (\mu_1 \cdot q_2 - \mu_2 \cdot q_1) \cdot e^{-T \cdot q_1}}{(\mu_1 \cdot x + q_1) \cdot (\mu_2 \cdot q_1 + \mu_1 \cdot q_2) \cdot e^{T \cdot q_1} - (\mu_1 \cdot x - q_1) \cdot (\mu_1 \cdot q_2 - \mu_2 \cdot q_1) \cdot e^{-T \cdot q_1}},$$

где $q_i \sqrt{x^2 - j \cdot \beta_i^2}; \beta_i = R_B \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot \sigma_i}$ – обобщенный параметр; μ_i, σ_i – относительная магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость i -го слоя; $T = \frac{S_1}{R_e}$ – нормированная толщина покрытия.

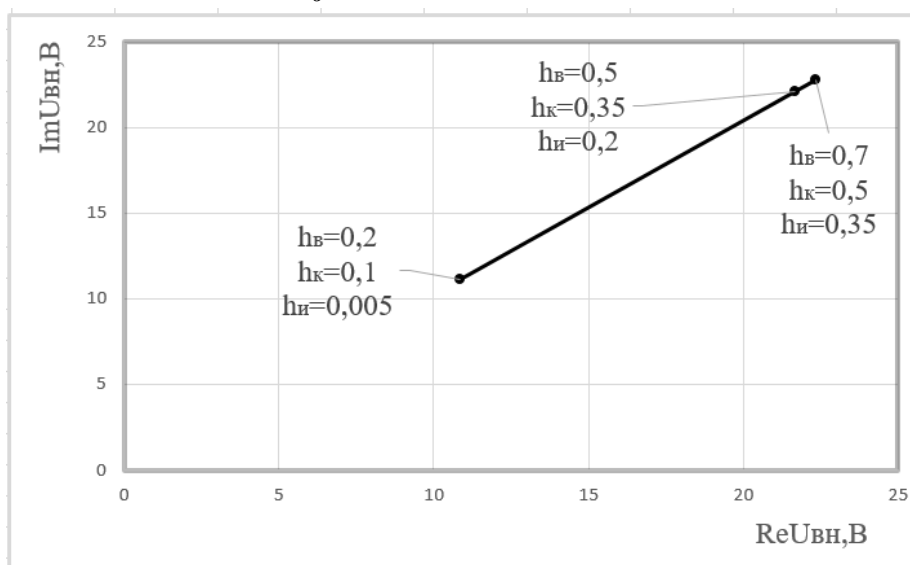


Рис.4 – График напряжения, вносимого в измерительную обмотку

В таблице 2 представлены результаты расчетов напряжения для разных значений h_B , h_K и h_U при $f = 7000$ Гц; $\sigma = 58,2 \times 10^6$ См/м, по представленным в ней результатам построен график напряжения, **Рис.4**, вносимого в измерительную обмотку при разных значениях h_B , h_K и h_U .

Таблица 2 – Результаты расчетов напряжения для разных h_B , h_K и h_U

σ , МСм/м	62,5		
h_B , мм	0,7	0,5	0,2
h_K , мм	0,5	0,35	0,1
h_U , мм	0,35	0,2	0,005
$\text{Re}(U_{BH})$, мВ	22,98	22,28	11,16
$\text{Im}(U_{BH})$, мВ	19,38	18,79	9,42

На **Рис.4** показано, что с увеличением расстояний от возбуждающей, измерительной и компенсационной обмоток до поверхности объекта контроля увеличивается вносимое напряжение.

Сравнительный анализ моделей (**Рис.5**) показывает, что добавление компенсационной катушки повышает выходное напряжение улучшающее процесс контроля.

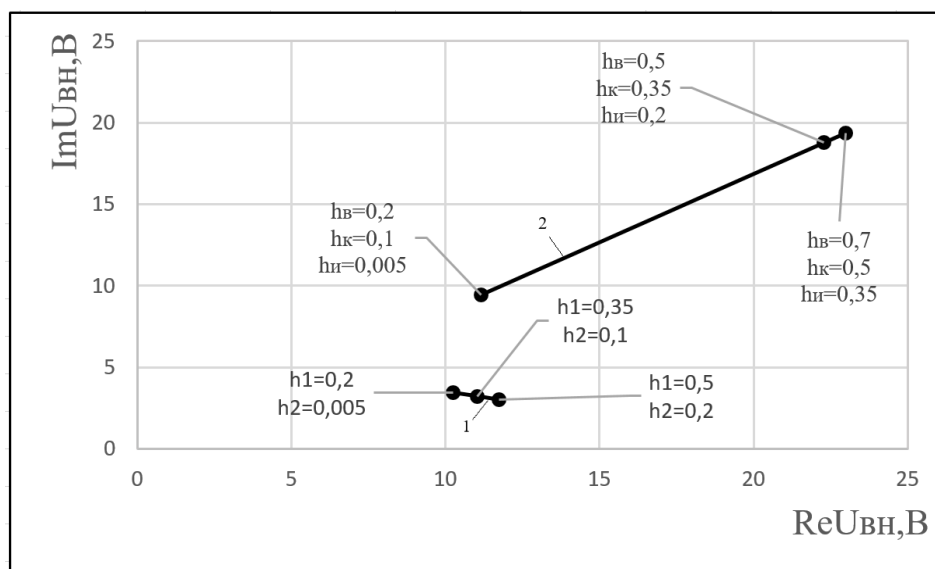


Рис.5 – График напряжения, вносимого в измерительную обмотку для двух преобразователей: 1 - накладной вихретоковый преобразователь с двумя обмотками, 2 - накладной вихретоковый преобразователь с тремя обмотками

Соответственно, для объекта контроля с большей толщиной необходимо использовать конструкцию с тремя обмотками, что позволит повысить качество контроля.

Библиографический список

1. Кузнецов Э.В. Электротехника и электроника. Том 3. Основы электроники и электрические измерения. / Э.В.Кузнецов, В. Г. Сергеев, П. С. Культиасов, В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, Г. П. Гаев, В. Е. Соломенцев – К. – Москва, 2017 – 234с.
2. Шубочкин А. Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля / А. Е. Шубочкин – К. – Москва, 2014 – 288с.
3. Маликов В.Н. Контроль неоднородностей, примесей и дефектов проводящих сплавов и композиционных материалов с помощью сверхминиатюрных вихретоковых преобразователей / В.Н. Маликов, А.М. Сагалаков – М. – Барнаул, 2019 – 151с.
4. Антонов А.А. Вихретоковый метод неразрушающего контроля / А.А. Антонов – М.У. – Москва, 2016 – 9с.
5. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т.2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688с.
6. Ключев В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Под ред. В.В. Ключева. Кн. 2 – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 352с

Bibliograficheskiy spisok

1. Kuznetsov E.V. Elektrotehnika i elektronika. Tom 3. Osnovy elektroniki i elektricheskiye izmereniya. / E.V.Kuznetsov, V. G. Sergeyev, P. S. Kul'tiasov, V. G. Gerasimov, O. M. Knyaz'kov, G. P. Gayev, V. Ye. Solomentsev – K. – Moskva, 2017 – 234s.
2. Shubochkin A. Ye. Razvitiye i sovremennoye sostoyaniye vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya / A. Ye. Shubochkin – K. – Moskva, 2014 – 288s.
3. Malikov V.N. Kontrol' neodnorodnostey, primesey i defektov provodyashchikh splavov i kompozitsionnykh materialov s pomoshch'yu sverkhminiaturnykh vikhretokovykh preobrazovateley / V.N. Malikov, A.M. Sagalakov – M. – Barnaul, 2019 – 151s.
4. Antonov A.A. Vikhretokovyy metod nerazrushayushchego kontrolya / A.A. Antonov – M.U. – Moskva, 2016 – 9s.
5. Klyuyev V.V. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T.2: V 2 kn. – M.: Mashinostroyeniye, 2003. – 688s.
6. Klyuyev V.V. Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy.

Spravochnik. V 2-kh knigakh. Pod red. V.V. Klyuyeva. Kn. 2 – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. –352 s.

¹*Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nataly2997@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет*

²*Заморёнов Михаил Вадимович, к.т.н., доцент, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Гета Данил Алексеевич, студент, danil_geta@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

*ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE EDDY CURRENT CONVERTER
DESIGN ON THE CONTROL OUTPUT DURING EDDY CURRENT CONTROL*

N.Y. Mirzoyan, M.V. Zamorenov, D.A. Geta

Mathematical models describing the effect of the eddy current converter design during eddy current control on the input voltage are considered. The results of modeling are presented and their analysis is carried out, which showed the possibility of increasing the sensitivity of eddy current control, due to the selection of the desired design.

Keywords: non-destructive testing, eddy current method, magnetic permeability, input voltage, field frequency, compensation, winding, core.

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

Zamorenov Mikhail Vadimovich, candidate of technical sciences, docent, docent, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Geta Danil Alekseevich, student, danil_geta@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЖИДКОСТОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ В НОРМОБАРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА С ЗАМКНУТЫМ ДЫХАТЕЛЬНЫМ ЦИКЛОМ

Поливцев В.П.¹, Балакин А.И.², Поливцев В.В.³, Гарматюк М.И.⁴

Аннотация. Предлагаются результаты исследования технологии жидкостного дыхания для аппарата с замкнутым дыхательным контуром. Сделан обзор разработанных медицинских аппаратов жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром. Предложена схема, в основе которой используется способ ультразвукового удаления газов, а также схема оксигенации (насыщения) дыхательной жидкости барботированием. Исследованы динамические характеристики насосов контуров вдоха и выдоха. Разработана инженерная методика определения скорости насыщения жидкости газом для схем с барботированием. Получены эмпирические зависимости коэффициента, определяющего скорость насыщения кислородом и концентрации кислорода в жидкости. Приведены графики, подтверждающие возможность использования полученных эмпирических зависимостей на практике для прогнозирования концентрации растворенного кислорода в жидкости.

Ключевые слова. Избыточное давление, жидкостное дыхание, дыхательный объем, дыхательная жидкость, замкнутый дыхательный контур, частота дыхания, концентрация растворенного кислорода, измерение концентрации кислорода.

Введение.

Применение технологии жидкостного дыхания и аппаратов жидкостной вентиляции легких (частичной жидкостной вентиляции легких (ЧЖВЛ) и тотальной жидкостной вентиляции легких (ТЖВЛ) в медицинских целях достаточно широко исследовано и описано в литературе [1-6]. Наиболее совершенные образцы аппаратов ТЖВЛ представлены образцами Inolivent – [3-7], разработанные канадскими учеными [7]. Различные конструкции аппаратов жидкостного дыхания и их узлов предложены авторами патентов [8-11]. Возможность применения жидкостного дыхания с использованием аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла в вышеизложенных областях является высокотехнологичной актуальной задачей.

Жидкостное дыхание (ЖД) представляет собой физиологический процесс, обеспечивающий нормальное течение метаболизма живых организмов и позволяет получать кислород не из воздуха, а из специально разработанных жидкостей. В процессе дыхания биологические объекты поглощают кислород, а

выделяют некоторую часть продуктов метаболизма таких, как углекислый газ, азот и кислород.

Областью применения жидкостного дыхания (ЖД) является возможность лечения людей, в лёгкие которых попала радиоактивная пыль, продукты горения в результате боевых действий или техногенных катастроф с помощью медицинских аппаратов жидкостного дыхания. Метод дает возможность вымыть радиоактивные частицы и продукты горения из пораженных органов дыхания, а мониторинг количества радиоактивных частиц в спец жидкости позволяет прекратить процесс по достижении желаемого результата. Вдобавок к изложенному, метод жидкостного дыхания даёт возможность спасать новорожденных младенцев с нераскрывшимися лёгкими, лечить больных с различными респираторными заболеваниями и поражениями легких.

Данная технология может быть использована для лечения осложнений для возбудителя новой коронавирусной инфекции COVID-19 – коронавируса SARS-CoV-2, основной мишенью которого являются альвеолярные клетки II типа (AT2) легких, что вызывает развитие пневмонии. Существуют и другие области применения жидкостного дыхания.

Технология ЖД перспективная, но недостаточно изученная в настоящий момент и требует дальнейших, как технических, так и медико-биологических исследований.

Основная часть.

Одной из основных задач разработки технологии жидкостного дыхания является создание аппаратов жидкостной вентиляции легких с замкнутым дыхательным контуром и проведение исследований безопасных режимов жидкостной вентиляции на имитаторах легких и модельных биообъектах. В данной работе проведены исследования работы аппаратов искусственной вентиляции легких с замкнутым дыхательным контуром на имитаторах легких. Исследования проводились для определения безопасных режимов работы аппаратов жидкостного дыхания. Определялись такие основные параметры работы аппаратов, как дыхательный объем, частота дыхания, мгновенный расход насосов вдоха и выдоха, давление в трубопроводах и легких при вдохе и выдохе. Рассматривались настройки по давлению и равенству расходов дыхательной жидкости контуров вдоха, выдоха, удаления газов и насыщения кислородом

Функциональная схема медицинского аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких представлена на **Рис.1**.

Экспериментальный медицинский аппарат принудительного жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром (**Рис.1**) состоит из контура вдоха, включающего электромагнитный клапан К2, датчик расхода жидкости ДР2, датчик давления ДД1, насосы Н2 и Н3, эластичную емкость ЕЭ2, шаровой кран

КШ2 залива/слива ПФУ и трубопроводы, фитинги, соединяющие их. Контур выдоха состоит из электромагнитного клапана К1, датчика расхода жидкости ДР1, насоса Н1, эластичной емкости ЕЭ1, шарового крана КШ1 залива/слива ПФУ, трубопроводов и фитингов. Контур вдоха и выдоха подключены к легким Л биологического объекта или имитатора легких. Замкнутый дыхательный контур включает фильтр Ф1, обеззараживатель ОУ, насос Н4, ультразвуковой газоудалитель ГУ, устройство оксигенации и терморегуляции УОТ с системой подачи кислорода, шаровых кранов КШ3 и КШ4 залива/слива ПФУ.

В устройство УОТ входит датчик уровня жидкости ДУ, нагреватель, регулируемый клапан сброса газа по давлению КП, насос Н5, фильтр Ф2 и обратный клапан ОК для сброса избытка не растворенных пузырьков кислорода и датчик температуры жидкости ДТ. Система подачи кислорода состоит из кислородной станции, пропорционального регулятора давления РДП, дросселя Др, электромагнитного клапана К3, датчика давления ДД2 и датчика расхода ДР3. Элементы, приведенные на функциональной схеме, управляются при помощи системы управления (на схеме не изображена). Цикл вдох/выдох осуществляется с дыхательным объемом от 0,1 до 0,4 л. Соотношение вдох/выдох от 1:2 до 1:3. Число циклов вдох/выдох от 4 до 10 в минуту.

Работа аппарата заключается в следующем:

При вдохе жидкость (ПФУ) насыщенная кислородом из эластичной емкости ЕЭ2 при помощи насосов Н2 и Н3, соединенных параллельно для увеличения расхода, подается в легкие Л через эндотрахеальную трубку. При этом клапан К2 открыт, а клапан К1 закрыт.

При выдохе клапан К1 открывается, а клапан К2 закрывается, и при помощи насоса Н1 жидкость (ПФУ) из легких Л через эндотрахеальную трубку подается в эластичную емкость ЕЭ1.

Расход жидкости измеряется датчиками расхода ДР1 и ДР2, а давление – датчиком давления ДД1.

Перекачка жидкости из емкости ЕЭ1 в емкость ЕЭ2 осуществляется при помощи насоса Н4 и Н5. При этом жидкость из емкости ЕЭ1 проходит через фильтр Ф1 в ультрафиолетовый обеззараживатель ОУ, где происходит стерилизация. Затем жидкость подается в ультразвуковой газоудалитель ГУ, в котором ультразвуковой генератор создает интенсивную кавитацию и происходит выделение углекислого газа и азота из жидкости. Далее жидкость поступает в емкость УОТ для оксигенации (насыщения кислородом), удаления углекислого газа и азота. Излишки не растворенного в дыхательной жидкости кислорода отделяются фильтром Ф2 и удаляются через обратный клапан ОК. Затем жидкость проходит через нагреватель в емкость ЕЭ2. Измерение температуры жидкости осуществляется датчиком температуры ДТ. Затем цикл

дыхания повторяется.

Важным при проектировании контуров вдоха - выдоха аппарата жидкостного дыхания является расчет и выбор насосов с возможностью регулировки и управления по расходу и давлению с учетом потерь давления в трубопроводах, датчиках давления и расхода, в электро-клапанах и эндотрахеальной трубки.

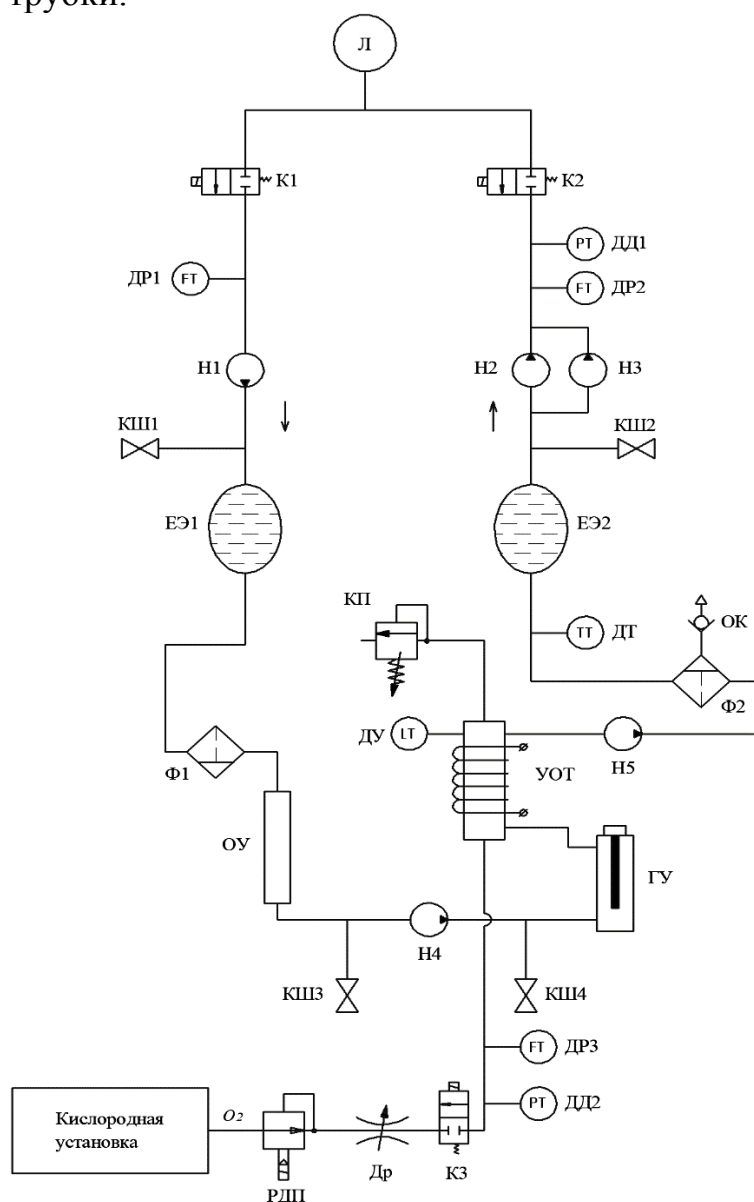


Рис.1 – Функциональная схема медицинского аппарата жидкостной вентиляции легких с замкнутым дыхательным контуром

Аппарат жидкостного дыхания, представленный на **Рис. 1** в контурах вдоха и выдоха, имеет насосы вдоха и выдоха: гибкие шланги, фитинги, электро-клапана, датчики расхода и давления. Оба контура вдоха и выдоха

соединены с легкими биообъекта (или имитаторами легких) через эндотрахеальную трубку. В данном случае эндотрахеальная трубка по давлению расходу, скорости потока является ограничивающей и требует расчетов на потери давления, скорости потока (расхода). Максимальный расход подаваемый от насоса, соотношение времени цикла вдох/выдох (на пример 1:2 или 1:3) определяет максимальный дыхательный объем искусственной жидкостной вентиляции легких.

Эндотрахеальная медицинская трубка по ГОСТ Р50580 2-93 имеет два вида гидравлических потерь: на трение по длине при внутреннем диаметре 8,0 мм и длине 0.32 м и местные потери при переходе из диаметра 10,1 мм в диаметр 8,0 мм.

Потери на трение по длине.

Скорость потока в эндотрахеальной трубке:

$$V = \frac{Q_v}{A_2}, \quad (1)$$

где V – скорость потока жидкости в м/с, Q_v – объемный расход протекающей через трубку дыхательной жидкости м³/с, A_2 – площадь проходного сечения эндотрахеальной трубки в м². $A_2 = \frac{\pi d^2}{4}$, где d – диаметр трубки в м.

Потери напора на трение по длине (формула Дарси – Вейсбаха):

$$\Delta h_L = \frac{\lambda L V^2}{d 2g}, \quad (2)$$

где L – длина трубки, g – ускорение свободного падения, λ – коэффициент гидравлических потерь определяется для ламинарного течения по формуле Стокса $\lambda = \frac{64}{Re}$, где число Рейнольдса, $Re = V \frac{4R_f}{\nu}$, а R_f – гидравлический радиус, ν – кинематическая вязкость в м²/с.

Определим падение давления через падение напора в трубке:

$$\Delta P_L = \Delta h_L \cdot \rho \cdot g, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости в кг/м³.

Тогда с учетом выражения (2) и (3) получим:

$$\Delta P_L = \lambda \frac{L V^2}{d 2} \rho, \quad (4)$$

Местные потери напора можно определить

$$\Delta h_M = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (5)$$

где ξ – коэффициент местных потерь $\xi = 0,5(1 - n)$, $n = \frac{A_2}{A_1}$. Тогда потери

давления с учетом плотности:

$$\Delta P_M = \Delta h_M \cdot \rho \cdot g. \quad (6)$$

Общие потери давления в эндотрахеальной трубке с учетом выражения (4), (6):

$$\Delta P_O = \Delta P_L + \Delta P_M. \quad (7)$$

Максимальный дыхательный объем жидкости с учетом соотношения времени вдоха/выдоха 1: 2 и частоты дыхания 6 циклов в минуту. Время вдоха 3,3с, выдоха 6,6с, частота дыхания 6 циклов в мин. Местные потери в эндотрахеальной трубке определяются переходом от внутреннего диаметра $A_1 = 10,1$ мм к внутреннему диаметру $A_2 = 8$ мм.

Определим параметры скорости потока, проходящего через эндотрахеальную трубку, потери давления и максимальный дыхательный объем в зависимости от расхода, развиваемого насосом на цикле - вдох с учетом выражений (1), (4), (6) и (7). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты расчетов параметров движения жидкости

Расход	5,0 л/мин	7,2 л/мин	9л/мин	12л/мин	15л/мин
Скорость потока	1,66 м/с	2,38 м/с	3,0 м/с	4,0 м/с	4,9 м/с
Потери давления от трения по длине	28 мбар	53,4 мбар	79,5 мбар	133 мбар	198 мбар
Потери давления от местного сопротивления	7,4 мбар	9,18 мбар	14,58 мбар	25,9 мбар	40,5 мбар
Общие потери давления	35,4 мбар	62,58мбар	94,18 мбар	158,9 мбар	238,5 мбар
Максимальный дыхательный объем	0,3л	0,4л	0,5л	0,66л	0,82л

Анализ расчетных (теоретических) потерь давления и скорости потока в эндотрахеальной трубке из выражений (1), (4), (6) и (7) показывает, что с увеличением расхода дыхательной жидкости подаваемой насосом в эндотрахеальную трубку, растут потери давления и увеличивается скорость потока дыхательной жидкости (Таб. 1). Скорость потока жидкости в пунктах расчета 4 и 5 приближается к критической даже для стальных трубопроводов гидравлических систем 5 м/с, а потери давления к номинальным значениям развиваемым насосом в 300 мбар. При скоростях и потерях давления по пунктам 4 и 5 управлять насосом становится невозможным и обеспечивать

безопасный режим работы аппаратом дыхания без разрыва легких биообъекта.

На **Рис.2–5** представлены циклы вдоха – выдоха с характеристиками расхода и давления до эндотрахеальной трубки.

Экспериментальные характеристики, представленные на **Рис.2** для цикла «вдох» при расходе дыхательной жидкости перед эндотрахеальной трубкой 4 л/мин., обеспечивают дыхательный объем 0,2л., а при цикле «выдох» расход 2,9 л/мин.

Экспериментальные характеристики, представленные на **Рис.3** для цикла «вдох» при расходе дыхательной жидкости перед эндотрахеальной трубкой 5 л/мин., обеспечивают дыхательный объем 0,25л., а при цикле «выдох» расход 3,1 л/мин.

Расчетный дыхательный объем 0,3л. при расходе дыхательной жидкости 5,0 л/мин и частоте дыхания 6 циклов в мин. не достигается, а достигается только при частоте дыхания 5 циклов в минуту.

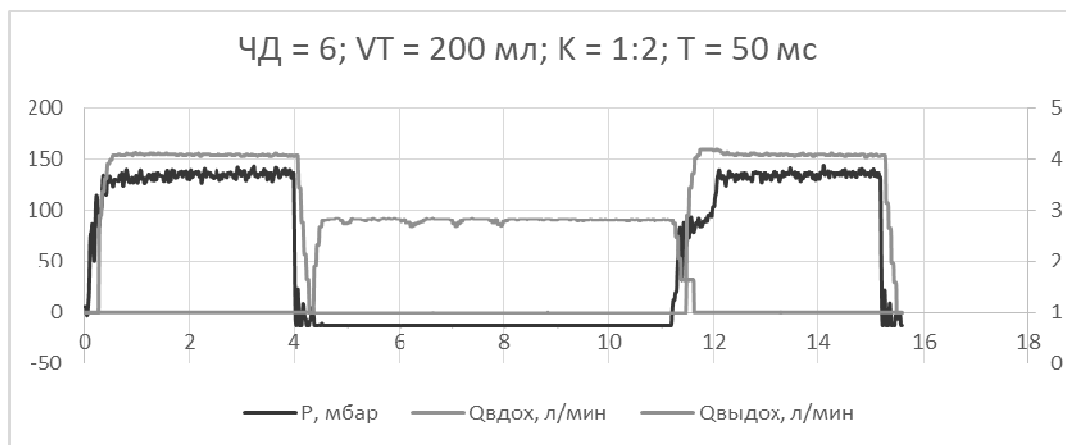


Рис.2 – Характеристики давления и расхода цикла вдох/выдох жидкостного дыхания при частоте дыхания 6 циклов в мин. и дыхательном объеме 200 мл

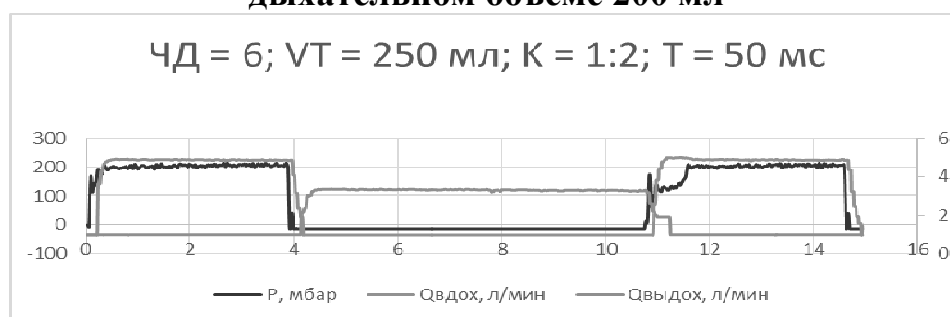


Рис.3 – Характеристики давления и расхода цикла вдох/выдох жидкостного дыхания при частоте дыхания 6 циклов в мин. и дыхательном объеме 250 мл

Экспериментальные характеристики, представленные на **Рис.4** цикла «вдох» при расходе дыхательной жидкости перед эндотрахеальной трубкой 4

л/мин., обеспечивают дыхательный объем 0,25л., а при цикле «выдох» расход 3,0 л/мин.

Экспериментальные характеристики, представленные на **Рис.5** цикла «вдох» при расходе дыхательной жидкости перед эндотрахеальной трубкой 5 л/мин., обеспечивают дыхательный объем 0,3л., а при цикле «выдох» расход 3,1 л/мин.

Расчетного дыхательного объема 0,3л. при расходе дыхательной жидкости 5,0 л/мин достигается при снижении частоты дыхания до 5 циклов в мин. представленном на **Рис.5**.

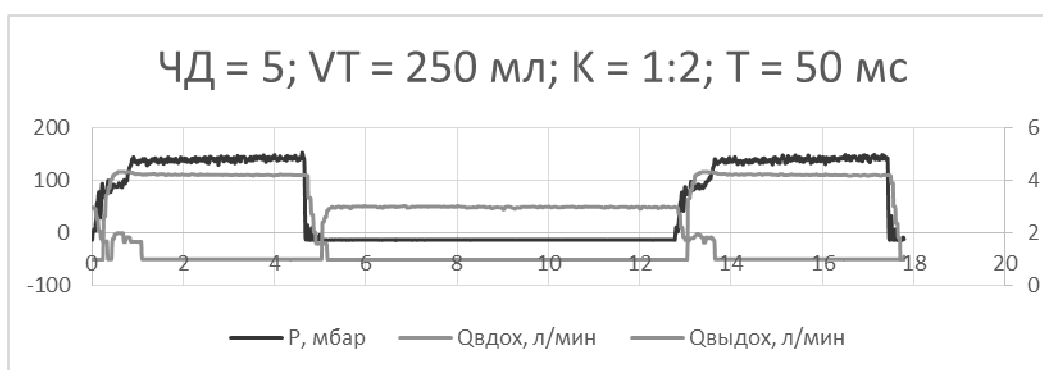


Рис.4 – Характеристики давления и расхода цикла вдох/выдох жидкостного дыхания при частоте дыхания 5 циклов в мин., и дыхательном объеме 250 мл

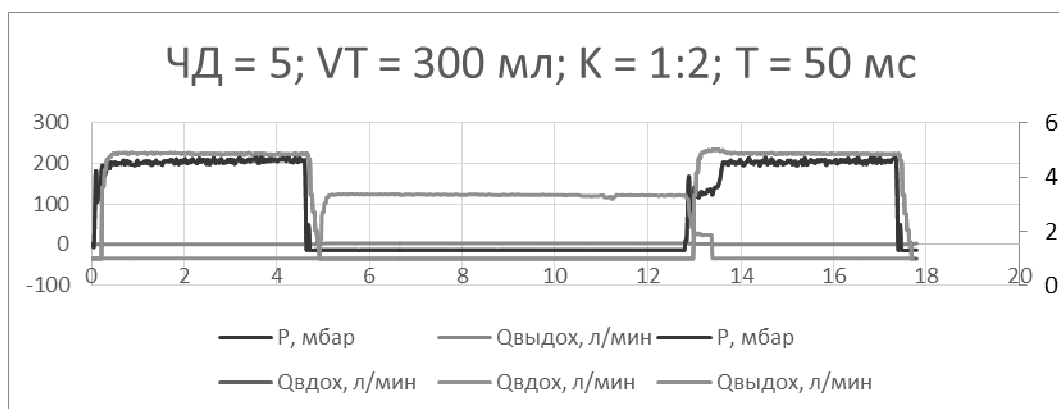


Рис.5 – Характеристики давления и расхода цикла вдох/выдох жидкостного дыхания при частоте дыхания 5 циклов в мин. и дыхательном объеме 300 мл

Для предотвращения разрыва легких насосы цикла вдох и выдох должны обеспечивать одинаковый объем подачи и выкачивания дыхательной жидкости, при этом давление в имитаторе легких с учетом потерь давления в эндотрахеальной трубке и электро-клапане не должно превышать 100 мбар.

Кроме контуров вдоха и выдоха, основным контуром для подачи дыхательной жидкости в емкость ЕЭ2 **Рис.1**, является узел оксигенации (насыщения жидкости кислородом) УОТ. Узел оксигенации обеспечивает насыщение кислородом дыхательной жидкости со скоростью определяемой конструкцией узла оксигенации. Рассмотрим скорость растворения кислорода в дыхательной жидкости для схемы оксигенатора представленного на рисунке 6 [13].

Насыщение дыхательной жидкости кислородом (воздухом) является важным процессом для восполнения кислорода после ее прохождения например - через легкие биообъекта.

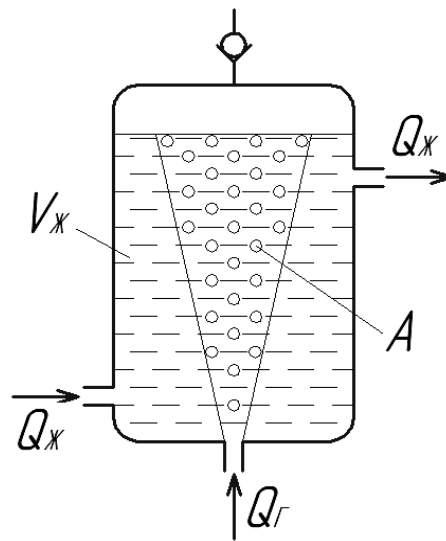


Рис.6 – физическая модель растворения газов в жидкости

Процесс растворения газа (скорость изменения концентрации например - кислорода) в дыхательную жидкость (рис. 6) зависит от площади поверхности разделяющей среду газ - жидкость, а также от градиента концентрации газа, и объема жидкости и его можно описать зависимостью [12]:

$$\frac{dC}{dt} = K_{LM} (C_S - C), \quad (8)$$

где $\frac{dC}{dt}$ – скорость изменения концентрации газа в жидкости во времени, мг/(л мин.); В таких случаях в уравнении (8) объединяют общий коэффициент перехода газа K_{LM} с коэффициентом K_L и отношением $\left(\frac{A}{V_{жс}}\right)$ и другими конструктивными параметрами аппаратов насыщения жидкости газом, C_S – возможная (максимальная) концентрация насыщения газом жидкости, мг/л; C –

концентрация газа в жидкости в любой момент времени, мг/л. A – площадь контакта газа и жидкости, см²; $V_{ж}$ – объем жидкости, см³

Интегрируя уравнение (8) и для граничных условий от C_n до C и от $t = 0$ до t , получаем следующие уравнения:

$$\ln\left(\frac{C_S - C_n}{C_S - C}\right) = K_{LM}t. \quad (9)$$

В уравнениях (9) и разность $(C_S - C_n)$ можно рассматривать - как величину начального насыщения газом жидкости $t_n = 0$, а $(C_S - C)$ – как величину концентрации газа спустя время $t_k = t$.

Определим значение коэффициента K_{LM} используя выражение (9), как приведено в [13].

$$K_{LM} = \frac{\ln\left(\frac{C_S - C_n}{C_S - C}\right)}{t}. \quad (10)$$

Зная значения C_S , C_n , C можно определить коэффициент K_{LM} .

Для его определения были проведены экспериментальные исследования зависимости концентрации кислорода в перфторуглеродной жидкости от времени при схеме барботирования, физическая модель, которой представлена на **Рис.6**. В качестве нормируемого объема был взят объем дыхательной жидкости один литр. Объемный расход кислорода менялся в пределах от 1 до 5 л/мин.

Рассмотрим объемный расход подаваемого и растворяемого кислорода – 1л/мин. Значение концентрации кислорода получались с использованием прибора RDO Blue. Ввиду большого числа значений экспериментальные данные в статье не приводятся.

Время насыщения кислородом жидкости в данном случае как указано в [13] принято 8 мин. Каждому моменту времени t соответствует значение C . Дискретность отсчета времени 1 с. Произведя аппроксимацию полученных экспериментальных данных получили эмпирическую зависимость коэффициента переноса газа в жидкость K_{LMar} , для расхода кислорода 1л/мин., при аппроксимации был использован полином десятой степени представленный выражением (11).

$$\begin{aligned}
K_{LMap} = & 0,0419370291505179 - 0,409334557128866 \cdot t + 0,836897984921998 \cdot t^2 - \\
& - 0,544351723306908 \cdot t^3 + 0,253405674374646 \cdot t^4 - 0,130651659490915 \cdot t^5 + \\
& + 0,0544162263373388 \cdot t^6 - 0,0138801230845294 \cdot t^7 + 0,00201349064342235 \cdot t^8 - \\
& - 0,000153480928416446 \cdot t^9 + 0,00000478426575698642 \cdot t^{10}
\end{aligned} \quad (11)$$

Критерий R-квадрат для данного полинома составляет 0,972329, что является удовлетворительным. Полиномы меньших степеней показали не удовлетворительный результат. На **Рис.7** приведены зависимости изменения коэффициента K_{LM} полученные на основе экспериментальных данных и на основе аппроксимирующего полинома.

Аналогичным образом были получены выражения для коэффициента K_{LM} при объемном расходе кислорода 3 л/мин (12) и 5 л/мин (13), представленные на Рис 8 и Рис. 9 соответственно.

$$\begin{aligned}
K_{LMap} = & 0,0734844469946037 - 1,69868626755942 \cdot t + 11,2741038875506 \cdot t^2 - \\
& - 30,0886770078262 \cdot t^3 + 45,5308804681116 \cdot t^4 - 42,2718185589964 \cdot t^5 + \\
& + 24,8948151934186 \cdot t^6 - 9,31504358699432 \cdot t^7 + 2,14145546873247 \cdot t^8 - \\
& - 0,275336054874950 \cdot t^9 + 0,0151354090092242 \cdot t^{10}
\end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
K_{LMap} = & -0,0533411263405819 - 1,40303443089370 \cdot t + 16,2023074094782 \cdot t^2 - \\
& - 61,1858699945333 \cdot t^3 + 120,383936742412 \cdot t^4 - 136,240258508768 \cdot t^5 + \\
& + 93,5273340048066 \cdot t^6 - 39,6013764021162 \cdot t^7 + 10,1075314413919 \cdot t^8 - \\
& - 1,42577295601319 \cdot t^9 + 0,0853775447306645 \cdot t^{10}
\end{aligned} \quad (13)$$

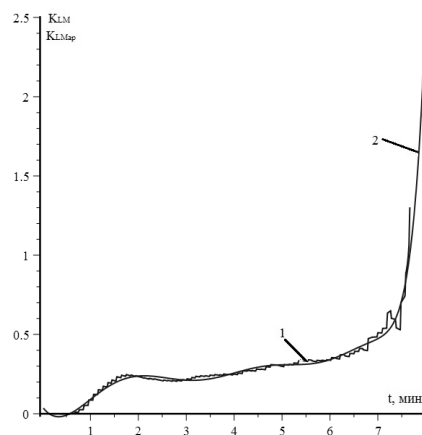


Рис.7 – Зависимость коэффициента K_{LM} от времени при расходе кислорода 1 л/мин: 1 – экспериментальные данные; 2 – результат аппроксимации

На основе выражения (9) получим зависимость изменения концентрации кислорода в дыхательной жидкости от времени:

$$C = \frac{e^{K_{LM}t} C_S + C_H - C_S}{e^{K_{LM}t}}. \quad (14)$$

Построим графические зависимости полученные на основе экспериментальных данных и на основе выражения (14) (Рис.10–12).

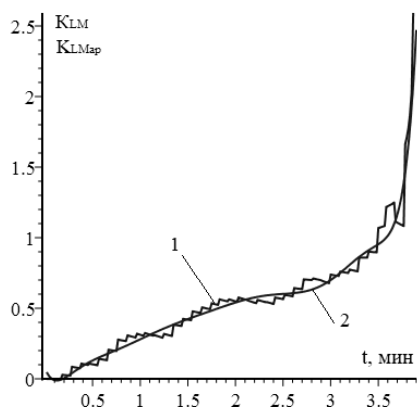


Рис.8 – Зависимость коэффициента K_{LM} от времени при расходе кислорода 3 л/мин
1 – экспериментальные данные; 2 – результат аппроксимации

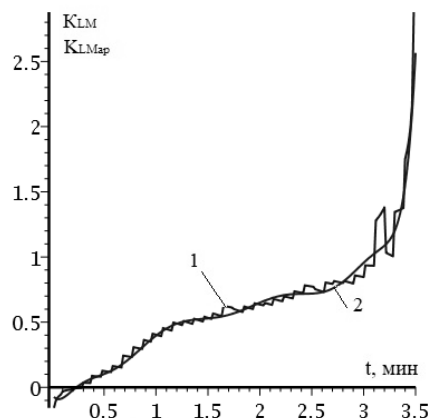


Рис.9 – Зависимость коэффициента K_{LM} от времени при расходе кислорода 5 л/мин
1 – экспериментальные данные; 2 – результат аппроксимации

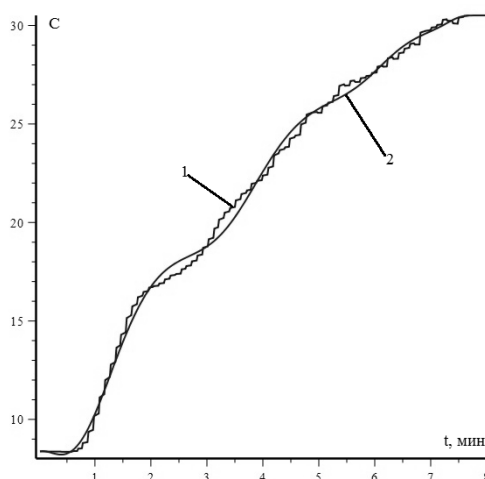


Рис.10 – Зависимость концентрации кислорода от времени при расходе кислорода 1 л/мин
1 – экспериментальные данные; 2 – аналитическая зависимость

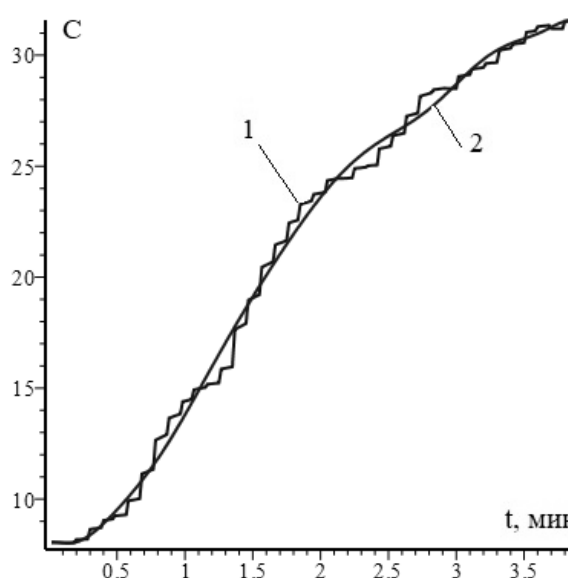


Рис.11 – Зависимость концентрации кислорода от времени при расходе кислорода 3 л/мин

1 – экспериментальные данные; 2 – аналитическая зависимость

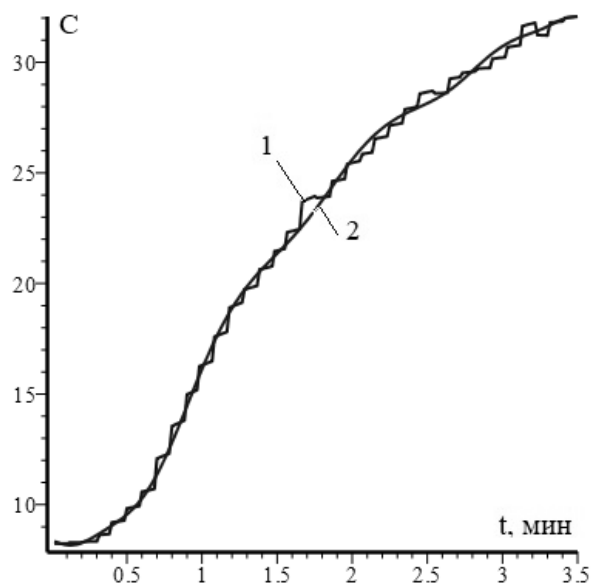


Рис.12 – Зависимость концентрации кислорода от времени при расходе кислорода 5 л/мин

1 – экспериментальные данные; 2 – аналитическая зависимость

Сравнение графических зависимостей показывает возможность использования выражения (12) для предварительного прогнозирования концентрации кислорода в дыхательной жидкости в зависимости от времени насыщения, с учетом значений коэффициента K_{LM} полученного из соответствующих выражений (11 – 13).

Выводы

1. Физические диаграммы жидкостных процессов динамики, циклов вдоха и выдоха представленные на **Рис.2–5** показывают, что процессы наполнения и удаления жидкости в легкие происходят без гидро-ударов и скачков давления и расхода.

2. Наличие в контурах вдоха и выдоха точных датчиков расхода жидкости (± 1 мл.) позволяют настроить одинаковый дыхательный объем, что исключает разрыв легких.

3. Теоретическая зависимость скорости растворения газа в жидкость определяется свойствами жидкости и газа, учитываемые коэффициентами K_L , K_H , расходом газа Q_g , объемом камеры оксигенации $V_{ж}$, где протекает

жидкость и радиусом пузырьков газа R диспергированной струи газа, связанных с коэффициентом K_z .

4. Полученная аналитическая зависимость (14) позволяет прогнозировать концентрацию кислорода в дыхательной жидкости в зависимости от времени насыщения. При этом выражения (11) – (13) для коэффициента K_{LM} получены путем аппроксимации экспериментальных данных в зависимости от объемного расхода газа Q_z .

5. При увеличении расхода кислорода его концентрация в дыхательной жидкости, также увеличивается при одинаковом времени насыщения. Однако следует отметить, что при расходе кислорода 3 л/мин и более, скорость изменения концентрации кислорода меняется не значительно.

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет – 2030 Севастопольского государственного университета (стратегический проект №2 «Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания»).

Библиографический список

1. Мороз В.В. Жидкостная вентиляция легких, ее возможности и перспективы (современное состояние вопроса) / В.В. Мороз, А.В. Власенко, И.О. Закс // Анестезиология и реаниматология. – 2001. – №6. – С. 66–73.
2. Мороз В.В. Эндотрахеальное применение перфторана в условиях ИВЛ у больных с острым респираторным дистресс-синдромом / В.В. Мороз, Д.А. Остапченко, А.В. Власенко, П.Ю. Осипов, Л.В. Герасимов // Общая реаниматология. – 2005. – С. 5–11.
3. Попцов В.Н. Первый клинический опыт использования частичной жидкостной вентиляции на основе эндобронхиального введения перфторана в комплексной терапии респираторного дистресс-синдрома / В.Н. Попцов, А.Е. Баландюк // Биомедицинский журнал Medline.ru. – 2004. – Т.5. – С. 173–174.
4. Sarkar S. Liquid ventilation / S. Sarkar, A. Paswan, S. Prakas // Anesth Essays Res. – 2014. – Vol.8, №3. – P. 277–282.
5. Корепанов А.Л. Жидкостное дыхание. Частичная жидкостная вентиляция легких / А.Л. Корепанов // Вестник физиотерапии и курортологии. – 2018. – Т.24, № 2. – С. 62–70.
6. Корепанов А.Л. Жидкостное дыхание. Тотальная жидкостная вентиляция легких / А.Л. Корепанов, О.Б. Шуневыч, И.Ю. Василенко // Вестник физиотерапии и курортологии. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 86–94.
7. Мишо П. Жидкостная вентиляция легких и метод индукции приливной жидкостной вентиляции и / или гипертермии / П. Мишо, Р. Тиссье, М. Надо,

- М. Кольхауэр, Дж. Вандамм, Дж. Муссо, Канада, L80011814WO, 12 апреля 2019 г.
8. Патент на полезную модель Российской Федерации, RU 203 4446 U1 МПК А61Н 31/02, А61М 16/00. Модуль жидкостного дыхания в условиях гипербарии для модельного биообъекта / Пашков Е.В., Поливцев В.П., Манчук Д.И., Поливцев В.В.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. №2020130505; заявл. 16.09.2020; опубл. 06.04.2021 Бюл. № 10.
 9. Патент на полезную модель RU 202 283 U1 МПК А61М 16/00, А61G 10/02. Установка для жидкостного дыхания / Пашков Е.В., Поливцев В.П., Калинин М.И., Поливцев В.В.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. №2020130508; заявл. 16.09.2020; опубл. 10.02.2021 Бюл. № 4.
 10. Патент на полезную модель RU 201 202 U1 МПК F16J 13/00. Быстродействующий мембранно-плунжерный затвор для камер гипербарических установок жидкостного дыхания / Пашков Е.В., Поливцев В.П., Коваленко А.В., Балакин А.И.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. №2020127187; заявл. 13.08.2020; опубл. 02.13.2020 Бюл. №34.
 11. Патент на полезную модель №215480. Аппарат жидкостного дыхания с замкнутым дыхательным контуром/ Поливцев В.П., Поливцев В.В., Пашков Е.В. заявл. 27.06.2022; опубл. 14.12.2022.
 12. Уитон Ф. Техническое обеспечение агрокультуры монография / Ф. Уитон – М.: Агропромиздат. 1985-528с., пер. с англ.
 - 13 Поливцев В.П. Исследование процесса насыщения газом жидкости в замкнутом контуре аппарата жидкостного дыхания / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев, А.И. Балакин // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2023. – № 2(22). – С. 77-96. – EDN CZPGBO.

Bibliograficheskiy spisok

1. Moroz V.V. Zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh, yeye vozmozhnosti i perspektivy (sovremennoye sostoyaniye voprosa) / V.V. Moroz, A.V. Vlasenko, I.O. Zaks // Anesteziologiya i reanimatologiya. – 2001. – №6. – С. 66–73.
2. Moroz V.V. Endotrakheal'noye primeneniye perftorana v usloviyakh IVL u bol'nykh s ostrym respiratornym distress-sindromom / V.V. Moroz, D.A. Ostapchenko, A.V. Vlasenko, P.YU. Osipov, L.V. Gerasimov // Obshchaya reanimatologiya. – 2005. – С. 5–11.
3. Poptsov V.N. Pervyy klinicheskiy opyt ispol'zovaniya chastichnoy zhidkostnoy ventilyatsii na osnove endobronkhial'nogo vvedeniya perftorana v kompleksnoy terapii respiratornogo distress-sindroma / V.N. Poptsov, A.Ye. Balandyuk // Biomeditsinskiy zhurnal Medline.ru. – 2004. – Т.5. – S. 173–174.

4. Sarkar S. Liquid ventilation / S. Sarkar, A. Paswan, S. Prakas // *Anesth Essays Res.* – 2014. – Vol.8, №3. – P. 277–282.
5. Korepanov A.L. Zhidkostnoye dykhaniye. Chastichnaya zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh / A.L. Korepanov // *Vestnik fizioterapii i kurortologii.* – 2018. – T.24, № 2. – S. 62–70.
6. Korepanov A.L. Zhidkostnoye dykhaniye. Total'naya zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh / A.L. Korepanov, O.B. Shunevych, I.YU. Vasilenko // *Vestnik fizioterapii i kurortologii.* – 2018. – T. 24, № 4. – S. 86–94.
7. Misho P. Zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh i metod induksii prilivnoy zhidkostnoy ventilyatsii i / ili gipertermii / P. Misho, R. Tiss'ye, M. Nado, M. Kol'khauer, Dzh. Vandamm, Dzh. Musso, Kanada, L80011814WO, 12 aprelya 2019 g.
8. Patent na poleznuyu model' Rossiyskoy Federatsii, RU 203 4446 U1 MPK A61N 31/02, A61M 16/00. Modul' zhidkostnogo dykhaniya v usloviyakh giperbarii dlya model'nogo bioob"yekta / Pashkov Ye.V., Polivtsev V.P., Manchuk D.I., Polivtsev V.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Fond perspektivnykh issledovaniy. №2020130505; zayavl. 16.09.2020; opubl. 06.04.2021 Byul. № 10.
9. Patent na poleznuyu model' RU 202 283 U1 MPK A61M 16/00, A61G 10/02. Ustanovka dlya zhidkostnogo dykhaniya / Pashkov Ye.V., Polivtsev V.P., Kalinin M.I., Polivtsev V.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Fond perspektivnykh issledovaniy. №2020130508; zayavl. 16.09.2020; opubl. 10.02.2021 Byul. № 4.
10. Patent na poleznuyu model' RU 201 202 U1 MPK F16J 13/00. Bystrodeystvuyushchiy menbranno-plunzhernyy zatvor dlya kamer giperbaricheskikh ustanovok zhidkostnogo dykhaniya / Pashkov Ye.V., Polivtsev V.P., Kovalenko A.V., Balakin A.I.; zayavitel' i patentoobladatel' Fond perspektivnykh issledovaniy. №2020127187; zayavl. 13.08.2020; opubl. 02.13.2020 Byul. №34.
11. Patent na poleznuyu model' №215480. Apparat zhidkostnogo dykhaniya s zamknutym dykhatel'nym konturom/ Polivtsev V.P, Polivtsev V.V., Pashkov Ye.V. zayavl. 27.06.2022; opubl. 14.12.2022.
12. Uiton F. Tekhnicheskoye obespecheniye agrokul'tury monografiya / F. Uiton – M.: Agropromizdat. 1985-528s., per. s angl.
13. Polivtsev V.P. Issledovaniye protsessa nasyshcheniya gazom zhidkosti v zamknutom konture apparata zhidkostnogo dykhaniya / V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev, A.I. Balakin // *Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino-priborostroyenii.* – 2023. – № 2(22). – S. 77-96. – EDN CZPGBO.

¹*Поливцев Виктор Петрович, заведующий лабораторией, VPPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, AIBalakin@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

³Поливцев Владимир Викторович, руководитель группы, VVPolivtsev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Гарматюк Михаил Игоревич, инженер I категории, MIGarmatyuk@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

RESEARCH OF LIQUID VENTILATION MODES IN NORMOBARIC PATIENTS USING A CLOSED-LOOP BREATHING APPARATUS

V.P. Polivtsev, A.I. Balakin, V.V. Polivtsev, M.I. Garmatyuk

Research on liquid breathing technology for closed breathing circuit apparatus is proposed. A review of developed medical liquid breathing devices with a closed breathing circuit is made. The scheme based on the ultrasonic gas removal method is proposed, and also the scheme of oxygenation (saturation) of respiratory fluid by barbotage. Dynamic characteristics of pumps of inhalation and exhalation circuits are investigated. The engineering method of determining the speed of liquid saturation with gas for schemes with barbotage is developed. Empirical dependences of the coefficient determining the oxygen saturation speed and oxygen concentration in the liquid are obtained. Graphs confirming the possibility of using the obtained empirical dependences in practice to predict the concentration of dissolved oxygen in the liquid are given.

Keywords: overpressure, fluid breathing, respiratory volume, respiratory fluid, closed breathing circuit, respiratory rate, dissolved oxygen concentration, oxygen concentration measurement.

Viktor Petrovich Polivtsev, head of the laboratory, VVPolivtsev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Balakin Alexey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, leading researcher, AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Polivtsev Vladimir Viktorovich, group leader, VVPolivtsev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Garmatyuk Mikhail Igorevich, engineer of I category, MIGarmatyuk@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА РАСПОЗНАВАЕМЫХ КОМАНД

Камцев В.А.¹, Филипович О.В.², Камцев Я.А.³, Еремин А.В.⁴

Аннотация. Дан анализа вариативности быстродействия и точности работы интерфейса мозг-компьютер (ИМК) на зрительных вызванных потенциалах (ЗВП) N100-200 и P300 в зависимости от количества распознаваемых команд. Проведено исследование с участием в нём группы испытуемых, в ходе которого производилось сравнение показателей эффективности работы интерфейсов с различным количеством команд. В результате менее тренированные испытуемые при работе с интерфейсом с большим количеством команд показывали меньшую точность и скорость их ввода, что свидетельствует о том, что при решении проблемы увеличения количества распознаваемых команд возникает необходимость в разработке и внедрении более совершенных методов зрительной стимуляции и алгоритмов определения целевых символов.

Ключевые слова. Интерфейс мозг-компьютер, зрительные вызванные потенциалы, потенциалы, связанные с событиями, стимульная среда, электроэнцефалограмма.

Введение. В настоящее время существует возможность использования показателей электроэнцефалограммы в качестве командных сигналов для создания интерфейсов управления внешними исполнительными устройствами. К возможным областям применения подобных интерфейсов мозг-компьютер можно отнести, например, помощь пациентам с нарушениями двигательной системы, тренажеры концентрации внимания, реабилитационная медицина [1]. Также подобные интерфейсы могут быть встроены в системы управления робототехническими устройствами для расширения манипуляторных функций человека.

Существует несколько методов реализации интерфейсов мозг-компьютер. Одним из первых и наиболее успешных по соотношению точности и скорости управления является ИМК «на волнах N100-200 и P300». В основе его работы лежит анализ компонентов потенциалов мозга, волн N100-200 и P300, который увеличивается при предъявлении ожидаемого пользователем значимого стимула среди незначимых, или так называемая oddball-парадигма. Данная, детектируемая по N100-200 и P300, реакция оператора на тот или иной стимул позволяет получить командный сигнал, связанный с соответствующим исполнительным механизмом объекта управления.

Эффективность работы интерфейса мозг-компьютер представляет собой способность интерфейса достигать заданных целей управления исполнительным устройством. В зависимости от специфики области применения интерфейса и особенностей управления и функционирования исполнительного устройства, к реализуемому интерфейсом процессу управления предъявляется ряд критериев. Каждому критерию ставится в соответствие показатель, к которым относятся вероятность успешного распознавания команд, время распознавания команды и максимальное количество распознаваемых команд.

Вероятность успешного распознавания команд или точность ввода команд определяется на основе расчёта доли безошибочно введенных команд среди всех попыток ввода. Время распознавания команды представляет собой время ввода одной команды при некотором фиксированном заранее заданном значении точности ввода. Максимальное количество распознаваемых команд ИМК определяет максимально возможное число контролируемых интерфейсом степеней свободы исполнительного устройства.

На предыдущем этапе, результаты которого описаны в [2], был разработан неинвазивный интерфейс мозг-компьютер на волнах N100-200 и P300, предназначенный для управления кинематическими парами робота-манипулятора типа SCARA. Всего существует две модификации (типа) интерфейса: первая поддерживает распознавание двух команд, а вторая – шести. Каждая из команд отвечает за перемещение рабочего органа робота трёхмерном пространстве.

Целью работы является определить зависимость между показателями эффективности работы ИМК на ЗВП N100-200 и P300 и максимально поддерживаемым количеством распознаваемых команд. Для определения характера этой зависимости предлагается проведение исследования с участием в нём группы испытуемых, в ходе которого сравниваются ИМК двух типов. по показателям: точность и скорость (количество введенных команд в минуту) ввода команд, продолжительность периода обучения.

Методика проведения исследования. В исследовании принимало участие 4 здоровых испытуемых (трое мужчин и одна женщина) в возрасте 19-21 год. Во время сессии испытуемые сидели за столом, на котором располагался монитор с предъявляемыми на нём зрительными стимулами. Положение символов на экране монитора в ходе проведения исследования оставалось неизменным. Для предъявления стимулов использовался 17,3-дюймовый экран с частотой обновления 60 Гц и разрешением 1920×1080. Расстояние от экрана до глаз испытуемого составляло 80 см.

В случае с ИМК второго типа стимулы были организованы в виде матрицы из двух строк и трёх столбцов, ячейки которой содержали символы

(Рис.1). В качестве символов выступали две прямые стрелки, одна из которых направлена вертикально вверх, а другая – вниз, и четыре круговые стрелки, две из которых направлены по часовой стрелке, а другие две против. Базовый цвет фона и фона ячеек был черным (RGB 0,0,0), а границы ячеек и символов в ячейках – светло-серым (RGB 190,190,190). Стимулом служило изменение цвета фона ячеек с черного на белый (RGB 255,255,255).

Специфическая форма начала и конца стрелок обусловлена тем, что в ходе проведения предварительных испытаний большая часть испытуемых жаловалась на затруднения при концентрации внимания на символах среднего и правого столбца. Данные символы имеют схожую форму, в связи с чем на уровне периферийного зрения расцениваются как почти одинаковые, что и может приводить к усложнению процесса концентрации. Для уменьшения негативного влияния подсветок нецелевых символов на результат классификации был использован тот факт, что человек воспринимает информацию, опираясь на некоторые опорные точки. В случае текста это могут быть начало и конец слов. По аналогии, после добавления отличных друг от друга фигур в начало и конец стрелок сами эти стрелки были более различимыми [3].

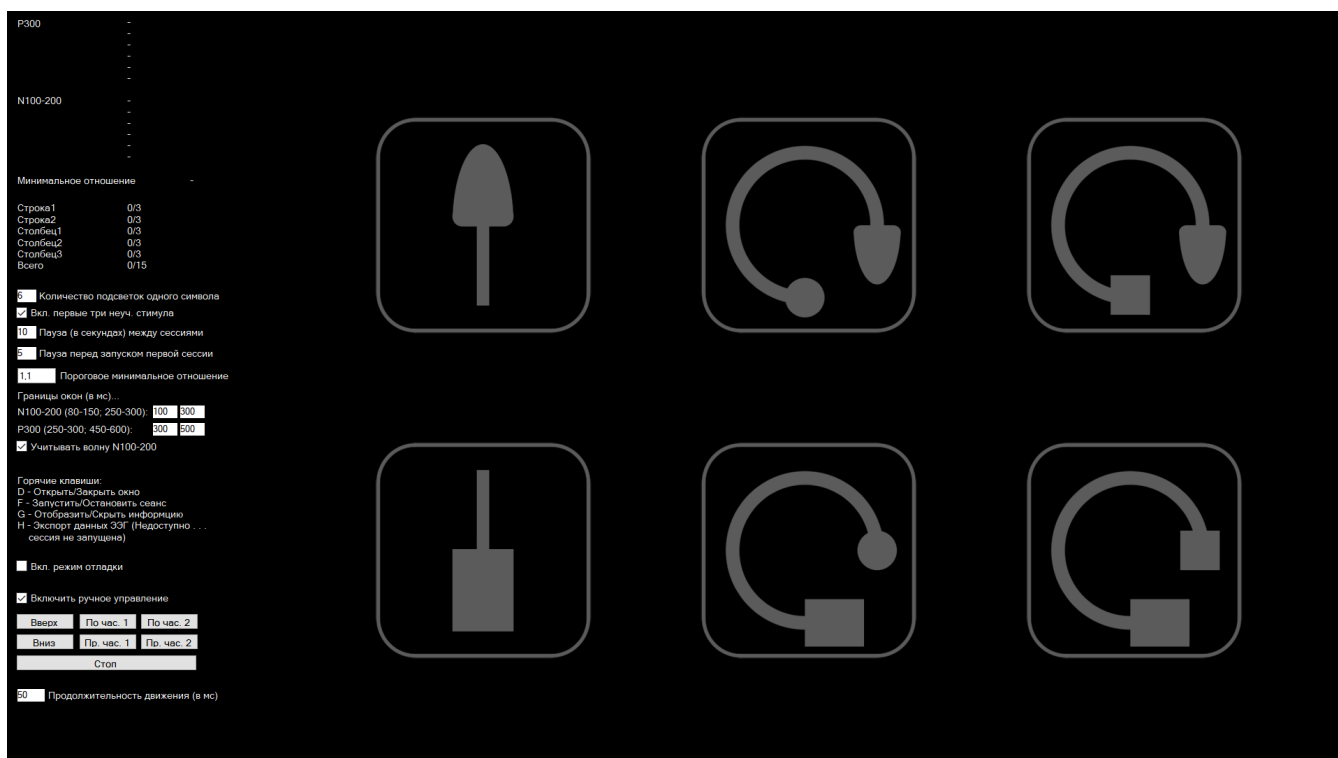


Рис.1 – Интерфейс стимульной среды ИМК второго типа

Стимулы предъявлялись в режиме oddball-парадигмы, который состоит в поочерёдных подсветках символов (строк и столбцов символов) в порядке,

соответствующем псевдослучайно сгенерированной стимульной последовательности. В рамках каждой последовательности порядок подсветок случаен, за исключением ограничения, заключающегося в невозможности предъявления одного и того же стимула более трёх раз подряд. Перед началом каждой последовательности по требованию испытуемых дополнительно производились однократные подсветки символов (столбцов символов) в случайном порядке, после которых не осуществляется анализ потенциалов, связанных с событиями (ПСС). Длительность одной подсветки составляла по умолчанию 150 мс, но изменялась по требованию испытуемых вплоть до 200 мс. Интервал времени между стимулами оставался фиксированным и составлял 500 мс. Через 10 секунд после предъявления всех стимулов последовательности начинался новый цикл стимуляции для выбора следующего символа.

Интерфейс стимульной среды обеспечивал возможности игнорирования волны N100-200, что было актуально в тех случаях, когда она не обладала достаточной выраженностью, а также установки границ окон поиска пиков волн N100-200 и P300, что позволяло их фиксировать в условиях вариативности их латентности. Так, при проведении предварительных испытаний с одним из испытуемых левая граница окна P300 сдвигалась влево для фиксации более раннего компонента P300a волны P300, устойчиво проявляющегося после подачи целевых стимулов (Рис.2) [4].

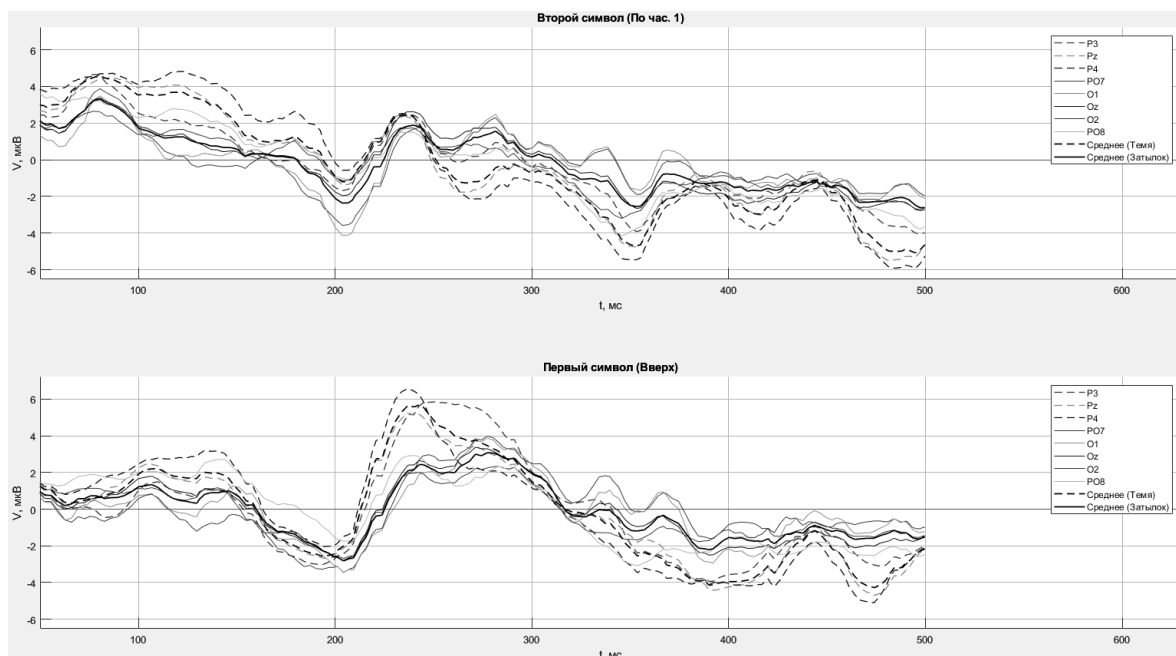


Рис.2 – Усреднённые ПСС в течение 500 мс после подачи стимула (первый символ – целевой)

В ходе проведения исследования задавалось пороговое значение

отношения разностей волн P300 и N100-200 максимального по выраженности стимула и наиболее близкого к нему по выраженности стимула. Цикл стимуляции продолжался до тех пор, пока текущее отношение не превышало пороговое, или пока не было произведено максимально возможное количество подсветок (в сумме не более 100 подсветок строк и столбцов).

Для возможности произведения оценки точности и быстродействия интерфейса испытуемым предлагалось работать в четырёх режимах.

Режимы работы оператора различались типом инструкции в отношении работы с целевым стимулом. В первом режиме работы оператора ему предлагали отработать 5 циклов стимуляции, во втором и третьем – 15 циклов, в четвёртом – 25 циклов. В первом режиме обратная связь по результатам распознавания целевого стимула отсутствовала, а во втором и последующих – присутствовала. Первый режим всегда предлагали первым, а четвёртый – последним. Порядок второго и третьего режимов шёл случайным образом.

В первом режиме от испытуемых требовалось в каждом цикле стимуляции наблюдать подсветки символов без концентрации на одном конкретном стимуле. Испытуемые не были ориентированы на какой-либо критерий успешности в работе по наблюдению целевых символов.

Во втором режиме от испытуемых требовалось в каждом цикле стимуляции смотреть на заданный экспериментатором целевой символ и производить подсчёт числа его подсветок, при этом стараясь не отвлекаться на подсветки других символов. Длины стимульных последовательностей непостоянно и изменяется каждые 5 пройденных циклов, принимая значения в порядке 6, 12 и 9. Пороговое отношение выраженностей ПСС целевых и нецелевых стимулов не учитывалось.

В своей стимульной части второй и третий режимы были схожи. Отличие заключалось только в том, что учитывалось пороговое отношение выраженностей ПСС целевых и нецелевых стимулов. Пороговое отношение было непостоянным и изменялось каждые 5 циклов стимуляции, принимая значения в порядке 1,1; 1,15; 1,2. Минимальная длина стимульной последовательности составляла шесть подсветок символов.

Работа испытуемых в четвёртом режиме состояла в следующем. Предварительно устанавливались время задержки между циклами (5 с), пороговое отношение выраженностей ПСС целевых и нецелевых стимулов и минимальная длина стимульной последовательности. Испытуемым предлагалось ввести 5 заранее заданных последовательность команд, длина каждой из которых составляла 5 команд. При повышенной утомляемости оператора сессия завершалась вне зависимости от количества введённых команд. Между реализациями последовательностей команд по делалась короткая пауза на отдых. Перед началом следующей попытки каждый раз

предлагались новые последовательности команд.

Отличия ИМК первого типа заключались в организации расположения и предъявления стимулов. Всего на экране монитора присутствовало два символа, первый из которых располагался в центре левой половины экрана, а второй – правой (**Рис.3**). Символы представляли собой стрелки, одна из которых направлена вертикально вверх, а другая – вниз. Цвет фона и фона символов был чёрным (RGB 0,0,0), контур символов – светло-серым (RGB 190,190,190). Стимулом служило изменение цвета фона символов с чёрного на белый (RGB 255,255,255).

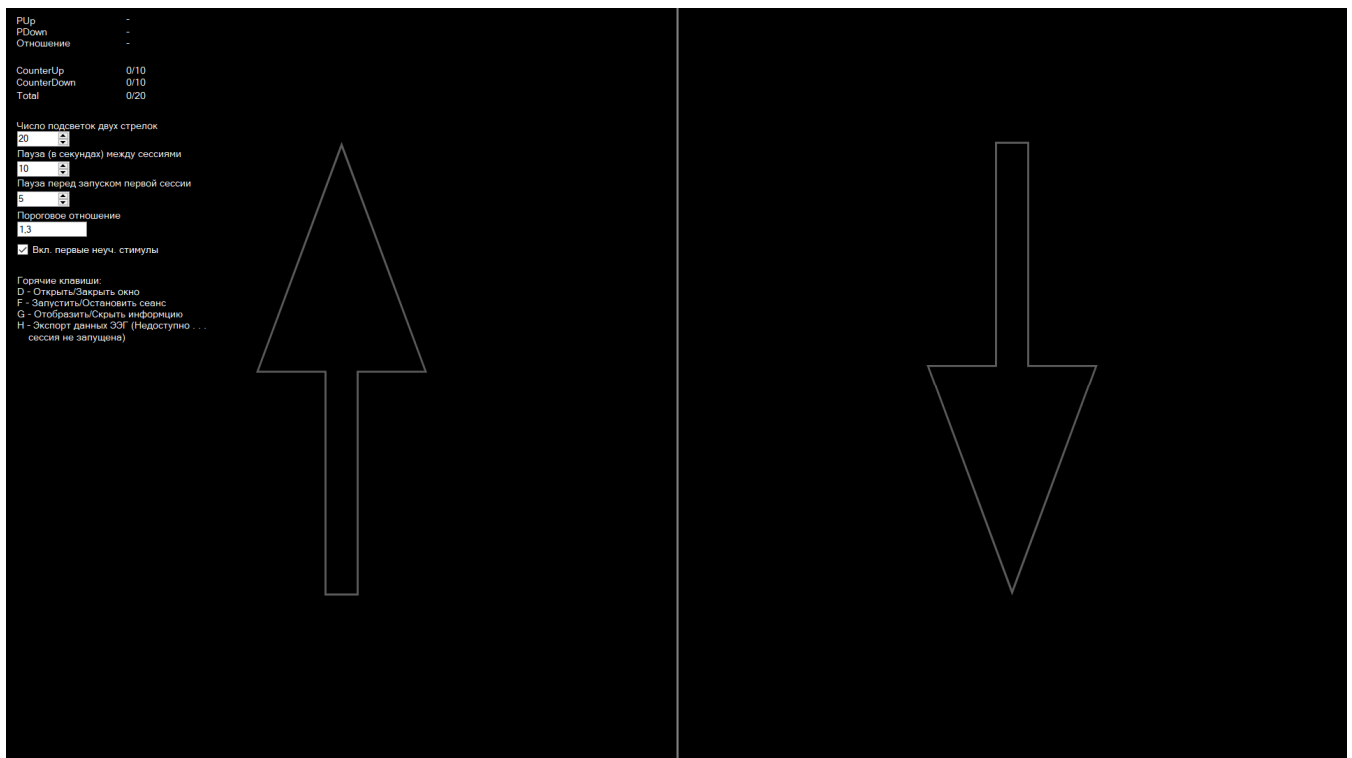


Рис.3 – Интерфейс стимульной среды ИМК первого типа

Также присутствовали отличия и в содержании режимов работы испытуемых. Во втором режиме работы длины стимульных последовательностей составляли 20, 6 и 12. В третьем режиме пороговое отношение принимало значения 1,3; 1,8; 2,3.

Каждый испытуемый прошёл по пять сессий на каждую модификацию ИМК, причём первая половина испытуемых начинала процесс обучения работе с интерфейсом первого типа, а вторая – второго. Сессии проводились каждый рабочий день.

Регистрация зрительных вызванных потенциалов производилась в теменной (волна P300; отведения Pz, P3 и P4) и затылочной (волна N100-200;

отведения PO7, O1, Oz, O2, PO8) областях зрительной коры больших полушарий головного мозга. Для анализа амплитуды волны P300 использовались значения, вычисленные в усреднённой по всем теменным каналам кривой, а в случае с волной N100-200 – по всем затылочным каналам. В качестве референта выступали соединённые электроды A1 и A2, расположенные на мочках ушей, а в качестве заземляющего электрода – Fz.

Перед записью ЭЭГ производилась проверка межэлектродного сопротивления. Запись начиналась только после того, как сопротивление было доведено до значений не более 10 кОм. При обработке результатов измерения производилась цифровая фильтрация сигнала в диапазоне 0,53-15 Гц (фильтр Баттерворта четвёртого порядка).

Статистический анализ показателей работы интерфейса мозг-компьютер производился по группе в целом. Для проведения исследований использовались стимульная среда и алгоритмы разработанного программного обеспечения, а также средства аппаратно-программного комплекса «Мицар-ЭЭГ» и пакета прикладных программ MATLAB.

Результаты исследования. Работа испытуемых в первом режиме необходима для получения результатов, на основании которых возможно выявить эмоциональную предрасположенность испытуемых к выбору того или иного символа. У интерфейса мозг-компьютер первого типа суммарно за пять дней из 100 предъявленных стимулов первый символ был распознан в качестве целевого 51 раз, второй – 49 раз. У интерфейса второго типа суммарно за пять дней из 100 предъявленных стимулов первый символ был распознан в качестве целевого 17 раз, второй – 19 раз, третий – 15, четвёртый – 15, пятый – 19, шестой – 15. Таким образом, формы символов не являлись для испытуемых эмоционально значимыми, что не приводило к появлению у испытуемых личной предрасположенности к какому-либо из символов и искажению результатов исследования [5].

Для оценки показателей точности и скорости работы интерфейсов обоих типов были использованы результаты выполнения испытуемыми только четвёртой задачи. Длина стимульной последовательности и значение порога устанавливались, исходя из результатов выполнения испытуемыми второй и третьей задач соответственно. Так, при решении второй задачи для обоих типов ИМК наибольшая точность ввода команд наблюдалась при минимальной длине стимульной последовательности в 6 подсветок и составляла $(80,0 \pm 7,5)\%$ для первого типа и $(61 \pm 13)\%$ – для второго. При решении же третьей задачи для первого типа интерфейса наибольшая скорость работы соответствует порогу в 1,3 (количество вводимых команд в минуту: $12,5 \pm 1,4$), а для второго типа – отношение 1,1 (количество вводимых команд в минуту: $4,18 \pm 0,48$). Выбранные таким образом показатели обеспечивали максимальную выраженность волн

Р300 и N100-200, наличие которой необходимо для эффективной работы ИМК.

Точность ввода команд испытуемыми на протяжении пяти сессий при различном количестве предъявленных стимулов представлена на **Рис.4**.

В случае с первой модификацией ИМК прослеживалась положительная динамика точности между сессиями: точность ввода команд выросла с $(68 \pm 20)\%$ в первой сессии до $(73,0 \pm 5,3)\%$ в пятой сессии. В четвёртой сессии достигается максимальное значение точности в $(83,0 \pm 5,1)\%$. Далее в пятой сессии точность несколько уменьшилась. Исходя из результатов, полученных в [6], существенный прирост точности должен наблюдаться до четвёртой сессии включительно, а дальнейший менее интенсивный – вплоть до 10 сессии.

В случае со второй модификацией ИМК точность возросла с $(44 \pm 29)\%$ в первой сессии до $(59 \pm 22)\%$ в пятой сессии. За все пять сессий максимальное значение точности в $(67 \pm 20)\%$ соответствует второй сессии. В четвёртой сессии точность также уменьшилась.

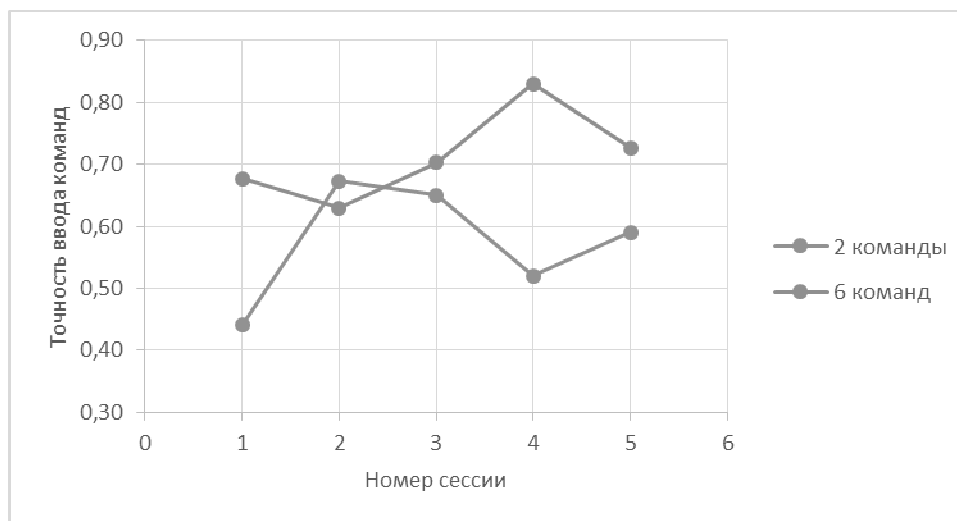


Рис.4 – Точность ввода команд испытуемыми на протяжении сессий

Примечательно, что при работе с ИМК второго типа у одного из испытуемых в первой, четвёртой и пятой сессиях успешно вводилось 23 команд из 25, а во второй и третьей сессиях – 24 команды, что соответствует достижению средней точности в $(94,0 \pm 1,9)\%$. Средняя скорость ввода команд составляла $4,320 \pm 0,060$ команд в минуту. Такой высокий результат нельзя объяснить случайными причинами, так как это число является результатом ввода 125 команд.

Количество вводимых команд в минуту на протяжении сессий показано на **Рис.5**.

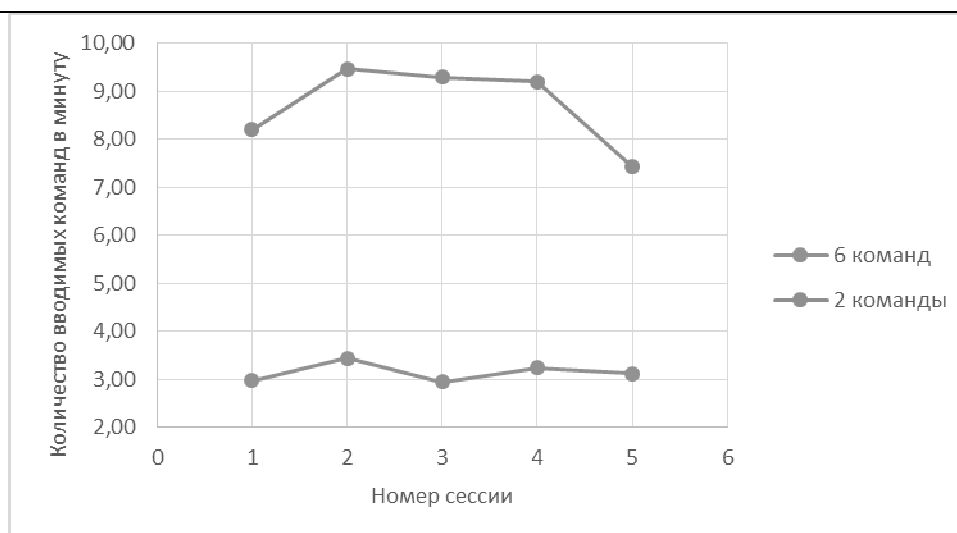


Рис.5 – Количество вводимых команд в минуту за каждую сессию

В случае с первой модификацией ИМК количество вводимых команд в минуту в среднем возрастало в ходе четырёх сессий и увеличилось с $8,2 \pm 2,4$ в первой сессии до $9,2 \pm 1,6$ в четвёртой сессии. Далее в пятой сессии наблюдался спад скорости до $7,4 \pm 1,6$ команд в минуту. Максимальное значение скорости было зафиксировано во второй сессии и составляло $9,5 \pm 3,6$ команд в минуту.

В случае со второй модификацией ИМК максимальное количество вводимых за минуту команд в $3,4 \pm 0,68$ приходится на вторую сессию. В последующих сессиях происходило колебание этого показателя.

Интерпретация результатов и выводы. Из результатов исследования следует, что в среднем по всей группе испытуемых вторая модификация ИМК проигрывает первой модификации ИМК по обоим показателям. Причём проигрыш идёт не только по среднему значению, но и по среднеквадратическому отклонению. При работе же с первым типом ИМК испытуемые показывали в среднем не только более высокий, но и более стабильный по разбросу результат.

Тем не менее, та половина группы испытуемых, которая начинала свой процесс обучения с интерфейса с двумя командами, при работе с интерфейсом с шестью командами показала следующие результаты: средние по всем сессиям точность ввода ($0,71 \pm 0,24$)% (максимум ($0,80 \pm 0,16$)% в третьей сессии) и $3,60 \pm 0,74$ (максимум $3,68 \pm 0,60$ в четвёртой сессии) команды в минуту. Для второй половины вероятность успешного распознавания команд и скорость ввода команд были существенно ниже: ($0,44 \pm 0,16$)% (максимум ($0,59 \pm 0,15$)% во второй сессии) и $2,60 \pm 0,23$ (максимум $2,79 \pm 0,23$ в четвёртой сессии) команды в минуту. Разница же в результатах работы половин группы испытуемых с первой модификацией ИМК невелика. Так, точность ввода команд половиной группы, прошедшей более продолжительный период

обучения, составила в среднем по всем сессиям $(0,72 \pm 0,18)\%$, а менее продолжительный – $(0,7 \pm 0,1)\%$.

Из этого и из того, что один из испытуемых показал стабильно высокий результат как по точности, так и по скорости ввода команд при работе с интерфейсами обоих типов, можно заключить, что оба типа интерфейса могут быть успешно использованы для управления внешними исполнительными устройствами. Отличие состоит лишь в том, что для эффективного использования ИМК второго типа и обеспечения высоких показателей эффективности его работы оператору необходимо пройти более продолжительный курс обучения по работе с ним, который составляет более чем десять сессий. Это может быть обусловлено тем, что после увеличения количества распознаваемых команд алгоритмы зрительной стимуляции и распознавания целевых стимулов оставались неизменными.

Относительно вопроса величины области применения, она более широка у ИМК, поддерживающего распознавание шести управляющих команд. Так, конструкция робота обеспечивает перемещение его рабочего органа в трёхмерном пространстве. Такое управление может быть обеспечено только интерфейсом второго типа (управление одной поступательной и двумя вращательными кинематическими парами), в то время как ИМК первого типа может управлять движением рабочего органа манипулятора только, например, вдоль вертикальной оси. В связи с этим представляется более перспективным в дальнейшем использовать вторую модификацию интерфейса.

Таким образом, при решении проблемы увеличения количества распознаваемых команд в интерфейсах мозг-компьютер на зрительных вызванных потенциалах возникают задачи сокращения продолжительности периода обучения и адаптации интерфейса для людей со сниженным уровнем внимания. Они могут быть решены путём применения более совершенных методов предъявления зрительных стимулов и алгоритмов обработки данных ЭЭГ, как это сделано в работах, например, [7,8].

Библиографический список

1. Каплан А.Я. Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «Интерфейс мозг – компьютер» /А.Я. Каплан, А.Г. Кочетова, С.Л. Шишкин и др. //Бюллетень сибирской медицины. - Т12, №2, 2013. – С.21-29.
2. Филипович О.В. Управление движением звеньев поступательной кинематической пары робота-манипулятора посредством интерфейса мозг-компьютер / О.В. Филипович, В.А. Камцев //Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2022. – № 3. – С. 17-25.
3. Rawlinson G. The Significance of Letter Position in Word Recognition. /

- G. Rawlinson // IEEE Aerospace and Electronic Systems. – 2007. – Vol. 22, № 1 – p. 26-27.
4. Zang S. Estimation of Event-Related Potentials from Single-Trial EEG / S. Zang, C. Zhou, F. Chao // 20th UK Workshop on Computational Intelligence (Aberystwyth, Wales, UK, September 8-10, 2021). – Springer Cham, 2021. – PP. 415-427.
5. Ганин И.П. Особенности электроэнцефалографических реакций на эмоционально значимые стимулы в технологии интерфейса мозг-компьютер на волне P300 / И.П. Ганин, Е.А. Косиченко, А.Я. Каплан // Журнал высшей нервной деятельности. – 2017. – № 4. – С. 453-463.
6. Ганин И.П. Набор текста пациентами с постинсультной афазией в комплексе «Нейрочат» на основе технологии интерфейсов мозг-компьютер на волне P300 / И.П. Ганин, С.А. Ким, С.П. Либуркина и др. // Журнал высшей нервной деятельности. – 2020. – № 4. – С. 435-445.
7. Ганин И.П. Источники и значимость вариативности потенциалов мозга человека в интерфейсе мозг-компьютер / И.П. Ганин, А.Н. Васильев, Т.Д. Глазова и др. // Вестник РГМУ. – 2023. – № 2. – С. 42-49.
8. Ганин И.П. Изучение эффектов вариативности потенциалов мозга человека в интерфейсе мозг-компьютер на волне P300 / И.П. Ганин, А.Я. Каплан // Вестник РГМУ. – 2022. – № 3. – С. 59-66.

Bibliograficheskiy spisok

1. Kaplan A.YA. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovaniya i prakticheskie realizacii tekhnologii «Interfejs mozg – komp'yuter» /A.YA. Kaplan, A.G. Kochetova, S.L. SHishkin i dr. //Byulleten' sibirskoj mediciny. - T12, №2, 2013. – S.21-29.
2. Filipovich O.V. Upravlenie dvizheniem zven'ev postupatel'noj kinematicheskoy pary robota-manipulyatora posredstvom interfejsa mozg-komp'yuter / O.V. Filipovich, V.A. Kamcev //Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii. – 2022. – № 3. – S. 17-25.
3. Rawlinson G. The Significance of Letter Position in Word Recognition. / G. Rawlinson // IEEE Aerospace and Electronic Systems. – 2007. – Vol. 22, № 1 – p. 26-27.
4. Zang S. Estimation of Event-Related Potentials from Single-Trial EEG / S. Zang, C. Zhou, F. Chao // 20th UK Workshop on Computational Intelligence (Aberystwyth, Wales, UK, September 8-10, 2021). – Springer Cham, 2021. – PP. 415-427.
5. Ganin I.P. Osobennosti elektroencefalograficheskikh reakcij na emocional'no znachimye stimuly v tekhnologii interfejsa mozg-komp'yuter na volne P300 / I.P. Ganin, E.A. Kosichenko, A.YA. Kaplan // ZHurnal vysšej nervnoj

deyatelnosti. – 2017. – № 4. – S. 453-463.

6. Ganin I.P. Nabor teksta pacientami s postinsul'tnoy afaziej v komplekse «Nejrochat» na osnove tekhnologii interfejsov mozg-komp'yuter na volne P300 / I.P. Ganin, S.A. Kim, S.P. Liburkina i dr. // ZHurnal vysshej nervnoj deyatelnosti. – 2020. – № 4. – S. 435-445.
7. Ganin I.P. Istochniki i znachimost' variativnosti potencialov mozga cheloveka v interfejse mozg-komp'yuter / I.P. Ganin, A.N. Vasil'ev, T.D. Glazova i dr. // Vestnik RGMU. – 2023. – № 2. – S. 42-49.
8. Ganin I.P. Izuchenie effektov variativnosti potencialov mozga cheloveka v interfejse mozg-komp'yuter na volne P300 / I.P. Ganin, A.YA. Kaplan // Vestnik RGMU. – 2022. – № 3. – S. 59-66.

¹Камцев Вячеслав Андреевич, аспирант, kva_m98@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Филипович Олег Викторович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, ophisl@yandex.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

³Камцев Ярослав Андреевич, студент 3-го курса, куаа_m03@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Еремин Алексей Васильевич, генеральный директор, Россия, Севастополь, ООО «Энергомедсервис»

RESEARCH OF THE VARIABILITY OF PERFORMANCE AND ACCURACY OF THE BRAIN-COMPUTER INTERFACE DEPENDING ON THE NUMBER OF RECOGNISED COMMANDS

V.A. Kamtsev, O.V. Filipovich, Y.A. Kamtsev, A.V. Eremin

The question of analysing the variability of performance and accuracy of the brain-computer interface (BCI) on visual evoked potentials (VEPs) N100-200 and P300 depending on the number of recognised commands is considered. A study involving a group of tested subjects was conducted to compare the performance of interfaces with different numbers of commands. As a result, less trained subjects when working with an interface with a larger number of commands showed lower accuracy and speed of their input, which indicates that when solving the problem of increasing the number of recognisable commands there is a need to develop and implement more advanced methods of visual stimulation and algorithms for identifying target symbols.

Keywords: brain-computer interface, evoked visual potentials, event related

potentials, stimuli environment, electroencephalogram.

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

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, ophisl@yandex.ru, Russia, Sevastopol State University

Kamtsev Yaroslav Andreevich, third-year student, kyaa_m03@mail.ru, Russia, Sevastopol State University

Eremin Alexey Vasilyevich, general director, Russia, Sevastopol, Energomedservis LLC

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №4(24) 2023 г.



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(692)550077

<https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/3655-avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashinopriborostroenii>

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: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 11.12.2023. Заказ 46/2023. Дата выхода в свет: 22.12.2023. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,37.

Севастополь, 2023