

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№2(18)
2022

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, 2022

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
Вартанов 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)
Пашков Е.В., 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., Шпаковский Н.А.** Поиск изобретательских решений 3
снижения шума льдоделательной машины в холодильнике посредством
ресурсов софта Solving Mill 2.0.
Бохонский А.И., Майстришин М.М., Мозолевская Т.В. Исследования 19
колебаний маятника волновой энергоустановки
Грушун А.И., Грушун Т.А., Осадченко А.Е. Параметрический анализ 30
быстродействия систем автоматического управления
Поливцев В.П., Пашков Е.В., Поливцев В.В. Аппарат жидкостного 41
дыхания со струйным оксигенатором дыхательной жидкости

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Прейс В.В.** Моделирование надежности резервированных роторных 52
систем автоматической загрузки штучных предметов обработки
Крамарь О.А., Панасенко В.В. Нейросетевой подход контроля 63
самостолкновений многозвенных манипуляторов робота SAR-401

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Серов А.Н., Иваненко К.А., Золкин Д.С.** Применение преобразователя 75
Герцеля для измерения параметров реактивной мощности
Балакин А.И., Поливцев В.В., Титков В.А. Исследование модуля 87
десатурации для аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких

УДК 658.512.2(075.8)

**ПОИСК ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ РЕШЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ШУМА
ЛЬДОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ В ХОЛОДИЛЬНИКЕ
ПОСРЕДСТВОМ РЕСУРСОВ СОФТА SOLVING MILL 2.0.**

Карлов А.Г.¹, Шпаковский Н.А.²

Аннотация. Представлен анализ особенностей работы морозильной камеры большого дорожного холодильника с целью снизить уровень шума льдоделательной машины. Анализ выполнен посредством ресурсов софта Solving Mill 2.0. Рассматриваются следующие проблемы: принцип работы льдоделательной машины в большом дорогом холодильнике; мини-завод по производству льда достаточно сложен, дорог в производстве и в эксплуатации, требует значительного расхода энергии. Льдоделательная машина занимает почти треть объема морозильной камеры, съедая полезное внутреннее пространство холодильника. Основное серьезное беспокойство представляет только один нежелательный эффект: шумная работа устройства. Посредством ресурсов софта Solving Mill 2.0. иллюстрируется технология изобретательского мышления, которая приводит решателя проблемы к вариантам устранения упомянутого недостатка этой подсистемы холодильника.

Ключевые слова. Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ), общая теория сильного мышления (ОТСМ), алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС), нежелательный эффект, вредный продукт, моделирование полезной системы, моделирование вредной системы, морозильная камера, полезное внутреннее пространство холодильника, шумная работа устройства.

Принцип работы простейшего устройства для замораживания воды в ледяные кубики — это ванночка, разделенная перегородками на ячейки. В ячейки наливается вода, ванночка ставится в морозильную камеру, и через некоторое время кусочки льда готовы. По такому же принципу работает льдоделательная машина и в большом дорогом холодильнике. Она замораживает кубики льда, складывает их в сборник и выдает пользователю по мере надобности. Отличие в том, что все операции выполняются устройством без участия человека. Такой мини-завод по производству льда достаточно сложен, дорог в производстве и в эксплуатации, требует значительного расхода энергии. Он занимает почти треть объема морозильной камеры, съедая полезное внутреннее пространство холодильника.

Целый комплекс нежелательных эффектов. Однако с ними потребитель был готов мириться. Серьезное беспокойство доставлял только один нежелательный эффект: шумная работа устройства. Дело в том, что кусочки льда могут смерзаться. Чтобы их разделить, время от времени в сборнике проворачивается специальный шнек. Это сопровождается грохотом и скрежетом.

Как уменьшить шум льдоделательной машины? Прежде, чем проиллюстрировать современные технологии изобретательского мышления и компьютерные программы поддержки процессов поиска инновационных решений актуальных проблем. Сделаем краткий экскурс в историю развития холодильной техники.

Для начала необходимо вспомнить, как люди научились получать искусственный лед.

Первое исторически достоверное известие о полностью искусственном получении льда из воды относится к 1775 г., когда В. Гюллен, откачивая насосом пар из-под стеклянного колпака, внутри которого находился сосуд с водой, получил в последнем лед.

В XVIII веке были открыты два различных способа получения низких температуры – сначала для замораживания воды, а впоследствии и для холодильных машин общего назначения. Первый из них связан с испарением жидкости, второй – с расширением воздуха, сопровождаемым производством внешней теплоты. Сначала оба эти способа развивались независимо друг от друга. Так было примерно до 60-х годов XIX в., когда холодильные машины стали выпускать массово и для разнообразных целей [7].

О первых попытках создать воздушные холодильные машины, работающие на сжатом воздухе, сохранились лишь отрывочные сведения. Так, в 1755 г. немец Хоэль в Хемнице (Австро-Венгрия) получил охлажденный воздух в результате его расширения. Примерно такие же исследования провел в 1771 г. в Швеции уроженец Мекленбурга Вильке.

Одновременно шло изучение охлаждения воздуха и других газов при расширении. Этим вопросом занимались Эразм Дарвин (дед Ч. Дарвина), Д. Дальтон и Гей-Люссак. Наконец в 1824 г. Сади Карно ввел понятие об обратном (холодильном) газовом цикле. Изучение этого вопроса продолжали Д. Гершель в 1834 г., а затем В. Сименс и А. Кирк в 50-60е годы XIX века.

Работы по созданию действующих образцов воздушных холодильных машин между тем продолжались и вышли на уровень, позволяющий применить их на практике. Есть сведения, что изобретатель паровых машин англичанин Р. Тревитик в конце 20х годов XIX века сделал несколько образцов машин, предназначенных для охлаждения воды и превращения ее в лед. Принцип их действия заключался в том, что

сжатый и затем охлажденный до температуры окружающей среды воздух выпускался в воду и, расширяясь там, охлаждал ее до выделения льда. Однако дальше опытов дело не пошло.

Первую действующую холодильную установку создал американский врач Дж. Горри. Он работал врачом в г. Апалачикола (штат Флорида). Жаркий климат этого района побудил Горри заняться холодильными делами. Видя своих пациентов, мучающихся от жары в помещениях больницы, он думал о том, как им помочь. Лед позволил бы создать в палатах совсем другой климат, но его не было. Горри решил сконструировать холодильную машину, позволяющую получать лед в количестве, достаточном для этой цели. В 1845 г. это ему удалось.

Модель установки Горри до сих пор хранится в патентном ведомстве США. "Льдоделательная" машина состояла из цилиндра диаметром около 200 мм, воздух в котором посредством поршня сжимался до 0,2 МПа. Тепло, выделяющееся при сжатии, отводилось посредством впрыскивания воды. Сжатый воздух поступал в цилиндрический горизонтальный ресивер, тоже охлаждаемый водой, пропускаемой по уложенным внутри трубкам. При последующем расширении воздуха в поршневом детандере в его цилиндр впрыскивалась соленая вода, которая при этом охлаждалась расширяющимся воздухом. Она и использовалась для получения льда. Машина исправно работала, и Горри захотел сделать свое изобретение доступным всем, кто в нем нуждался. В мае 1851 г. он получил патент на свою машину. Из приложения к патенту видно, что Горри усовершенствовал свою машину, заменив впрыск соленой воды погружением в соленую воду. С современной точки зрения, схема машины почти безупречна. Компрессор и детандер в этой машине конструктивно несовершенны, но в то время не было почти никакого опыта создания воздушных компрессоров, а тем более расширительных машин - детандеров. Можно было использовать только идеи и конструктивные элементы из опыта создания паровых двигателей. Тем не менее, Горри, не имевший ни инженерного образования, ни практики, сумел разработать эти машины и на их основе создать вполне работоспособный агрегат [7].

Идея Горри послужила основой для дальнейшего развития холодильников. В 1857 г. В. Сименс, немецкий техник, переселившийся в Англию, опубликовал труд, в котором критически рассматривал машины Горри. Отдавая должное достоинствам, Сименс отметил и недостатки. Но, критикуя, он также искал пути устранения этих недостатков. В замечаниях Сименса сказано, что воздух, который выходит из цилиндра детандера и расходуется на охлаждение соленой воды, недостаточно охлаждается, если его подавать непосредственно в воду, как сделано у Горри. Он предложил этот воздух не выпускать, а направлять в специальный теплообменный

аппарат противотоком к сжатому воздуху, идущему в детандер. Это предложение было им запатентовано.

Открытие регенерации тепла произвело подлинный переворот и в дальнейшем нашло широкое применение не только в низкотемпературной технике, но и во многих областях энергетики [7].

История развития холодильной техники и соответствующих технологий сама по себе очень интересна и поучительна. Мы ниже упоминаем еще несколько важных фактов из этой истории, без которых трудно понять устройства современных холодильников.

Большую роль в получении домашнего и промышленного холода сыграл К. фон Линде. Он изобрел промышленный способ сжижения газов. В 1879 году фон Линде создал холодильную машину с компрессором, работавшем на аммиаке. Благодаря этой именно этой машине и началось производство льда в больших масштабах. Холодильные машины Линде устанавливались на мясных бойнях и пищевых фабриках. Ими оснастили вагоны, речные и морские суда. Позже уменьшенная машина Линде стала сердцем домашних холодильников.

В изобретении Линде холодный рассол или аммиак циркулировал по разветвленной системе труб, охлаждая помещения с продуктами. Появились большие торговые и промышленные холодильные склады.

В 1893 году американец Элайя Томсон оснастил компрессионный холодильник электроприводом. Но такой аппарат был очень далек от совершенства. Он имел приводные ремни и производил много шума. Из-за утечек газа - аммиака или сернистого ангидрида – в помещении стоял неприятный запах. Холодильные шкафы обычно помещали в подвалы, чтобы избавиться от шума и неприятного запаха.

Отцом современных холодильников можно считать датского инженера Стинструпа. В 1926 году он накрыл компрессор и его электродвигатель герметичным колпаком. Это сделало домашний холодильник бесшумным, безвредным и долговечным. Патент на агрегат Стинструпа приобрела корпорация "General Electric" [7]. Теперь требовалось найти другой носитель холода, чтобы избавиться от аммиака и сернистого ангидрида. На смену им пришел фреон, открытый и изученный бельгийцем Свартом. В жидком состоянии фреон кипит при – 32,8 °С, химически пассивен и неядовит.

Теперь холодильники стоят в каждом доме или квартире. Они стали привычными, и вряд ли их владельцы знают о труде тысяч изобретателей и инженеров, работавших над идеей развития обычного бытового прибора.

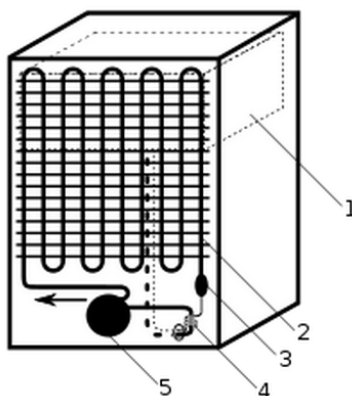


Рис.1 – Основные подсистемы холодильного агрегата бытового холодильника: 1 - испаритель; 2 - конденсатор; 3 - фильтр-осушитель; 4 - капилляр и теплообменник; 5- компрессор [7]

Целью настоящего исследования является краткое описание работы над проблемой совершенствования подсистемы холодильника, которая по сути является ледоделательной машиной с анализом возможностей софта Solving Mill 2.0 для достижения приемлемого результата.

Программное обеспечение создано компанией Target Invention Ltd. Научный руководитель компании Шпаковский Н.А. Коллектив кафедры ПСАТП сотрудничает с этой компанией уже много лет. Как я уже отмечал в предыдущих публикациях, в ноябре 2021 года мой коллега и соавтор многих публикаций Николай Андреевич Шпаковский скоростно скончался из-за коварного ковида. Но как эту, так и ещё ряд статей мы со Шпаковским Н.А. планировали вместе еще в 2021 году, и поэтому я публикую и этот материал в соавторстве. Я благодарен Николаю Андреевичу за многолетнее творческое сотрудничество и дружбу.

Данная статья продолжает серию публикаций, позволяющую достаточно детально ознакомиться с сутью, особенностями, базовыми процедурами и результатами применения софта Solving Mill 2.0. в процессах генерации изобретательских идей при создании концептуальных решений инновационных продуктов и технологий автоматизированных процессов в различных сферах промышленного производства. Более детально с возможностями софта и некоторыми изобретательскими решениями, полученными в результате работы с этим программным продуктом можно познакомиться в источниках [2 – 6].

Теоретическая основа Solving Mill: теория решения изобретательских задач (ТРИЗ), общая теория сильного мышления (ОТСМ) и смежные дисциплины. Методическая основа: алгоритм исправления проблемных ситуаций (АИПС-2015).

Фрагменты отчета по теме «Льдоделательная машина»

Generator: Solving Mill version SM-2.0

Рассмотрим некоторые из процедур и результаты применения софта Solving Mill 2.0. в процессе поиска возможностей снижения шума льдоделательной машины холодильника. Ниже размещены некоторые фрагменты отчета работы Решателя с указанным софтом.

Опишите проблемную ситуацию в свободной форме.

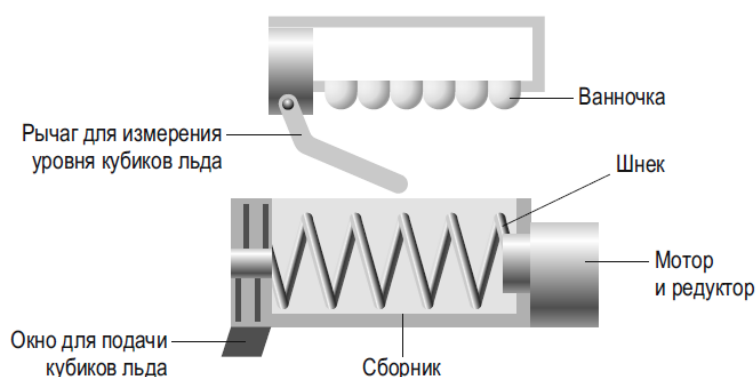


Рис.2 – Система для производства ледяных кубиков [2, 5]

Решатель проблемы получает от программы вопросы и нужно находить ответы для продолжения диалога в соответствии с алгоритмом.

Один из первых вопросов софта к Решателю: «Вы можете сформулировать условие задачи?». Ответ может быть «да» или «нет». Далее диалог продолжается. Если ответ решателя «нет», то следует следующая серия вопросов-ответов софта, необходимых комментариев.

Определение обстоятельств проблемной ситуации.

Каковы функции льдоделательной машины в большом дорогом холодильнике? Она замораживает кубики льда, складывает их в сборник и выдает пользователю по мере надобности. Все операции выполняются устройством без участия человека. Такая подсистема для производства льда сложна, дорога в производстве и в эксплуатации, требует значительного расхода энергии. Он занимает почти треть объема морозильной камеры, съедая полезное внутреннее пространство холодильника. Имеет место ряд нежелательных эффектов. Но потребитель был готов мириться. Наиболее серьезное беспокойство доставлял только один нежелательный эффект: значительный шум при работе устройства. Кусочки льда могут смерзаться. Чтобы их разделить, время от времени в сборнике проворачивается специальный шнек (**Рис.2**). При этом возникает значительный грохот и скрежет. Цель поиска изобретательского решения – снижение шума льдоделательной машины.

Вы можете сформулировать условие задачи?

✓ Да

Нет

Составьте условие задачи по следующей схеме

Система для производства ледяных кубиков состоит из сопла для подачи воды, ванночки, сборника, шнека, мотора, редуктора и окна для подачи кубиков льда. При нормальном ходе дела система работает следующим образом.

Ванночка заполняется водой. Таймер выдерживает время, нужное для ее замерзания. Затем включается двигатель с червячным редуктором, и толкатель переворачивает ванночку, упираясь в ее угол. Когда ванночка почти перевернута вниз ячейками, вторая ее сторона упирается в выступ (Рис.3.). Ванночка перекашивается, ледяные кубики отделяются от ее стенок и падают в накопитель. Это повторяется до тех пор, пока накопитель не заполнится. Тогда рычаг выключает устройство для подачи воды.

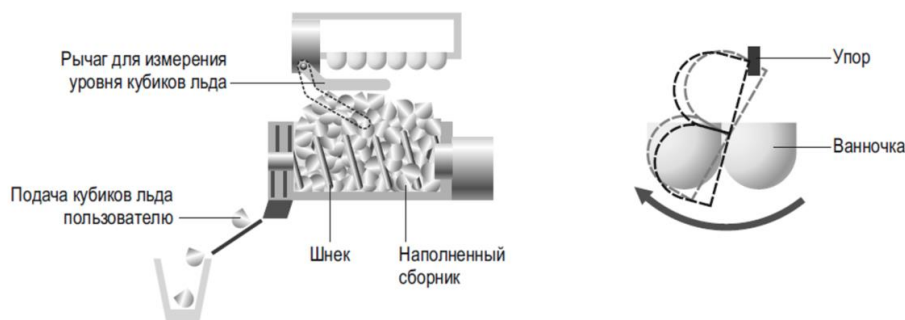


Рис.3 – Схема работы подсистемы подачи готовых кубиков льда пользователю [2,5]

Чтобы получить порцию льда, пользователь подставляет стакан в специальную нишу в дверце холодильника. Мотор начинает вращать шнек в накопителе, и кусочки льда сыплются в подставленную посуду. Неиспользованные ледяные кубики сохраняются в накопителе.

При открывании двери теплый воздух попадает в морозильную камеру и лед подтаивает. Затем, при понижении температуры, отдельные кубики начинают смерзаться в единый монолит. Разбить смерзшийся кусок льда непросто. Поэтому примерно раз в полчаса или чаще шнек, приводимый во вращение мощным электродвигателем, проворачивается и разламывает смерзающиеся кубики.

При этом возникает проблема: «Шумная работа шнека в сборнике при разбивании смёрзшихся кубиков».

Определите доступные ресурсы

Пространственные ресурсы (оперативная зона)

Пространство, занимаемое ванночкой и сборником.

Временные ресурсы (оперативное время)

Время работы шнека.

Вещественные ресурсы

Сопло для подачи воды, ванночка, сборник, шнек, электромотор, редуктор, окно для подачи кубиков льда.

Полевые ресурсы

Тепловое поле (холод), механическое поле.

Предложите решение задачи наилучшим известным или самым простым способом

Нужно упростить устройство, для чего удалить лишние его части.

Выполнить льдоделатель в виде большой ванночки. В ванночке замерзает вода, затем ванночка переворачивается и кубики высыпаются.

Необходимо обеспечить условие, при котором все кубики задерживались бы в перевернутой ванночке, за исключением нужного их количества.

Прямая аналогия: если бы нам нужно было вытряхнуть из обычной ванночки несколько кубиков, остальные мы бы придерживали рукой.

Идея решения 1. Расположить под перевернутой ванночкой какой-то компонент, который препятствовал бы одновременному выпадению всех кубиков, но позволял бы выпадать им из ячеек по одному или малыми группами.

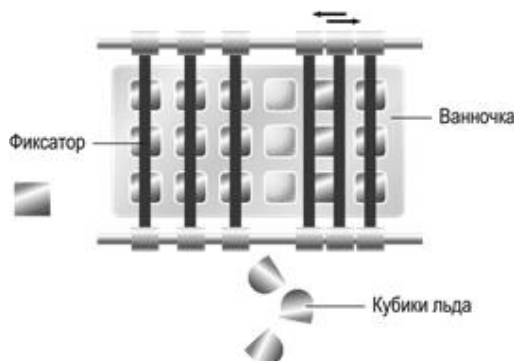


Рис.4 – Идея решения 1 [2,5]

Идея решения 2. Использовать ванночки с раздвигающимся дном. Таким дном могут быть фиксаторы, если их сделать на ширину ячейки. Освободившееся от льда ячейки необходимо сразу заполнить водой.

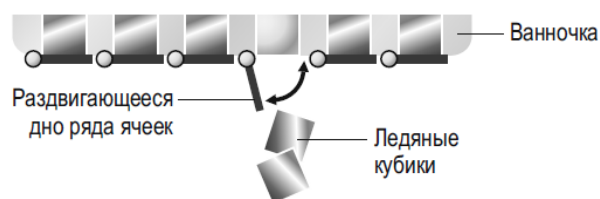


Рис.5 – Идея решения 2 [2,5]

Идея решения 3. Использовать одноразовые ванночки, например, из тонкой пленки. Запас льда хранится в нескольких ванночках. Они размещаются в пространстве, которое прежде было нужно для переворота ванночки. Чтобы извлечь ледяные блоки, нужно разорвать пленку. После извлечения льда ванночка идет в отходы, а ее место занимает другая, уже заполненная водой. Появляется расходный материал и затем возникают отходы, которые нужно периодически утилизировать.

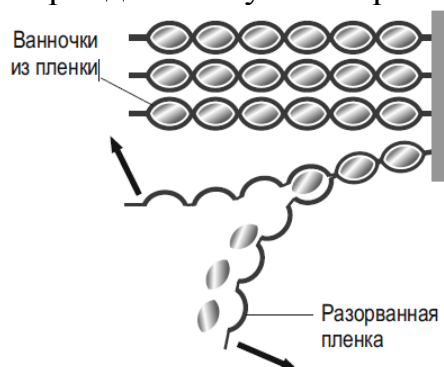


Рис.6 – Идея решения 3 [2,5]

Устраивает ли это решение?

Да

✓ Нет

Почему не устраивает решение?

✓ Нет вообще минимально приемлемого решения.

Возникают проблемы с требуемым действием.

При реализации решения ухудшается другой параметр системы.

Возникает противоречие к компоненту системы.

Сформулируйте модель задачи "Условия в оперативной зоне"

Необходимо обеспечить условия работы ванночки, при которых можно получить большое количество кубиков. При этом необходимо обеспечить простоту извлечения кубиков и непрерывность процесса замораживания воды.

Рекомендуемые преобразования

Ввести в оперативную зону новый компонент.

✓ Преобразовать компонент оперативной зоны.

Удалить компонент из оперативной зоны.

Укажите компонент в оперативной зоне для преобразования

Ванночка для замораживания воды в ледяные кубики.

Какие атрибуты компонента "Ванночка для замораживания воды в ледяные кубики" и как нужно преобразовать?

Размер

Форма

Наиболее целесообразно преобразовать форму ванночки.

Преобразовать структурную модель задачи в модель решения можно с применением линий развития. Если проследить логику предложенных решений, то можно заметить, что:

- 1) количество ванночек растет — сначала была одна, затем несколько;
- 2) усиливается динамичность ванночки (у нее появляются подвижные фиксаторы, затем раздвигаемое дно, а потом ванночка вся делается из гибкого пленочного материала).

Соответственно, здесь прослеживаются линии «Моно-би-поли» (Рис.7):

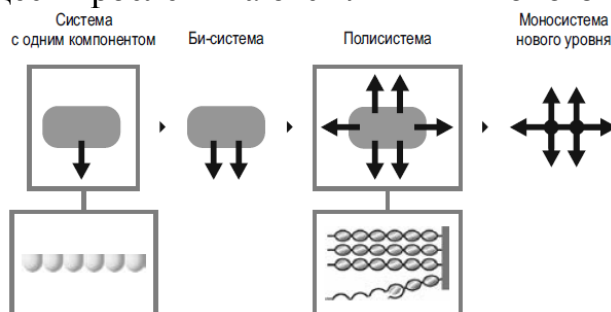


Рис.7 – Применение линий развития формы ванночки [2,5]

Можно применить еще одну линию развития: «Динамизация» (Рис.8).

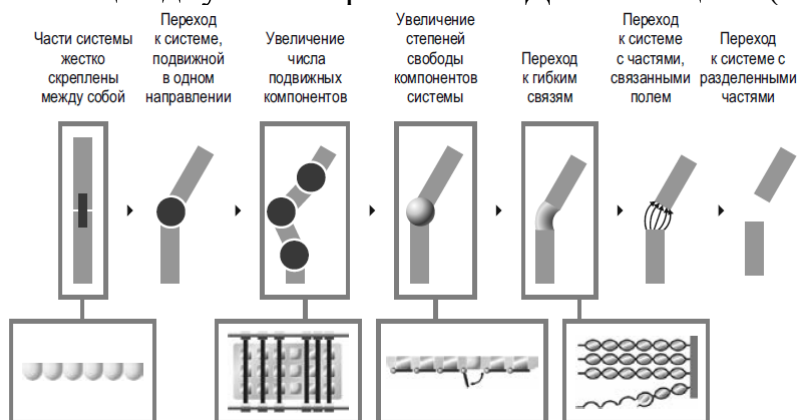


Рис.8 – Применение линии развития ванночки «Динамизация» [2,5]

Исходя из этих линий развития, можно сказать, что искомая формочка должна быть моно-системой на новом уровне, то есть объединять несколько ванночек в одну систему. Кроме этого, новая цельная ванночка должна быть динамичной в степени "гибкие связи", то есть ряды ванночек должны быть объединены гибкой обечайкой. Получается форма: кольцевая ванночка.

Динамичность: Привести кольцевую ванночку во вращательное движение (Рис.9).

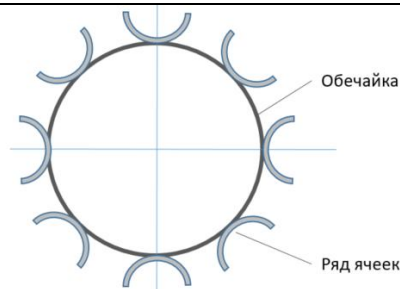


Рис.9 – Кольцевая ванночка с возможностью вращения [2,5]

Требуется ли преобразовать систему?

Да

✓ Нет

Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да

✓ Нет

Предварительное решение 1

Расположить ряды ячеек по кругу на кольцевой основе, которая может вращаться, подавая пользователю готовые кубики и подставляя под заполнение водой новые пустые ячейки (**Рис.10**).



Рис.10 – Предварительное решение 1: ротор с вращением с заполнением ячеек водой и простым механизмом выгрузки ледяных кубиков [2,5]

Преимущества: конструкция устройства упрощается; производительность не снижается.

Недостатки: круговая траектория движения кубиков дает возможность заливать водой только несколько ячеек.

Данное решение устраивает?

Да

✓ Нет

Почему не устраивает решение?

Нет вообще минимально приемлемого решения.

Возникают проблемы с требуемым действием.

При реализации решения ухудшается другой параметр системы.

✓ Возникает противоречие к компоненту системы.

Формулировка модели задачи "Физическое противоречие"

Основа с ячейками должна быть выполнена в виде кольца, чтобы обеспечить круговое движение ячеек;

Основа с ячейками должна быть прямолинейной и горизонтальной, чтобы можно было заливать водой большое количество ячеек.

К какому атрибуту компонента относится требование?

✓ Размер, форма, положение.

Поверхность.

Внутренняя структура, материал.

Динамичность

Управляемость.

Выберите тип противоречия:

Противоречивые значения параметра требуются в одном и том же месте.

Противоречивые значения параметра требуются в одно и то же время.

✓ Противоречивые значения параметра требуются в одном и том же месте в одно и то же время.

Выберите подходящее преобразование:

Перейти в надсистему.

Перейти на микроуровень.

✓ Скомбинировать компонент с заданным состоянием и "анти-компонент" с другим состоянием.

Изменить фазовое состояние компонента, его части или окружающей среды.

Использовать возникновение или исчезновение вещества за счёт разложения, соединения, ионизации и т.п.

Модель решения.

Для разрешения противоречия, связанного с атрибутом размер/форма/положение, скомбинировать компонент с заданным состоянием и "анти-компонент" с другим состоянием.

Укажите, как это преобразование может быть применено для решения данной задачи:

Скомбинировать две формы обечайки: кольцевую и прямолинейную.

Требуется ли преобразовать систему?

Да.

✓ Нет.

Требуется ли дополнительно преобразовать компоненты системы?

Да.

✓ Нет.

Предварительное решение 2:

Расположить ячейки рядами на ленточном транспортере гусеничного типа (Рис.11).

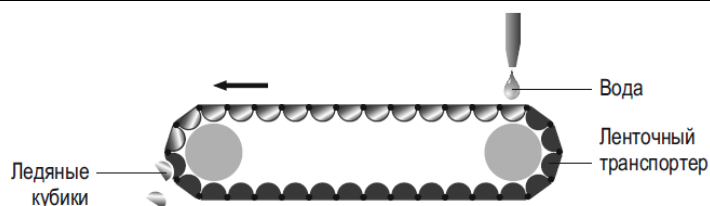


Рис.11 – Предварительное решение 2: ячейки рядами на ленточном транспортере гусеничного типа [2,5]

Данное решение устраивает?

✓ Да

Нет

Сформулируйте финальное решение.

Расположить ячейки рядами на ленточном транспортере гусеничного типа.

Решение завершено - поздравляем!

В отчёте по проекту представлены все найденные решения в виде автоматически сгенерированной заготовки формулы предполагаемого изобретения.

Пункт 1. Устройство, включающее сопло для подачи воды, ванночка, сборник, шнек, электромотор, редуктор, окно для подачи кубиков льда, в котором Расположить ячейки рядами на ленточном транспортере гусеничного типа (**Рис.11**).

Пункт 2. Устройство по пункту 1, в котором Нужно упростить устройство, для чего удалить лишние его части. Выполнить льдоделатель в виде большой ванночки. В ванночке замерзает вода, затем ванночка переворачивается и кубики высыпаются. Необходимо обеспечить условие, при котором все кубики задерживались бы в перевернутой ванночке, за исключением нужного их количества. Прямая аналогия: если бы нам нужно было вытряхнуть из обычной ванночки несколько кубиков, остальные мы бы придержали рукой.

Идея решения 1. Расположить под перевернутой ванночкой какой-то компонент, который препятствовал бы одновременному выпадению всех кубиков, но позволял бы выпадать им из ячеек по одному или малыми группами (**Рис.2**).

Идея решения 2. Использовать ванночки с раздвигающимся дном. Таким дном могут быть фиксаторы, если их сделать на ширину ячейки. Опустевшие ячейки нужно сразу заполнять водой (**Рис.5**).

Идея решения 3. Использовать одноразовые ванночки, например, из тонкой пленки. Запас льда хранится в нескольких ванночках. Они размещаются в пространстве, которое прежде было нужно для переворота ванночки. Чтобы извлечь ледяные блоки, нужно разорвать пленку. После

извлечения льда ванночка идет в отходы, а ее место занимает другая, уже заполненная водой (**Рис6**).

Пункт 3. Устройство по пункту 1, в котором Расположить ряды ячеек по кругу на кольцевой основе, которая может вращаться, подавая пользователю готовые кубики и подставляя под заполнение водой новые пустые ячейки (**Рис.10**).

Преимущества: конструкция устройства упрощается; производительность не снижается

Недостатки: круговая траектория движения кубиков падает возможность заливать водой только несколько ячеек.

Выводы:

1. Применение программного продукта Solving Mill 2.0. позволяет значительно ускорить процессы анализа предпроектной ситуации, лучше понять алгоритмы поиска изобретательских решений, приобрести и закрепить на практике необходимые навыки поиска нетривиальных изобретательских решений.

2. Приведенные в статье «Фрагменты отчета по теме «Льдоделательная машина» дают возможность читателям проследить алгоритм диалога софта с Решателем, терминологию и ресурсы программы, увидеть итог анализа в виде автоматически сгенерированной заготовки патентной формулы предполагаемого изобретения.

Библиографический список

- 1 Шпаковский Н.А. ОТСМ-ТРИЗ: подходы и практика применения: учеб. пособие / Н.А. Шпаковский. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 504 с.
- 2 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.
- 3 Карлов А.Г. Обоснование актуальности и алгоритма системной подготовки специалистов проектирования инновационной техники и технологий / А.Г. Карлов // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2018. – № 3(7). – С. 26-43.
- 4 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 машиноприборостроении. – 2018. – № 4(8). – С. 3-17.
- 5 Сайт компании Target Invention Ltd: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://solving-mill.com>
- 6 Сайт Обучающая система ТРИЗ-тренинг: [электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://triztrainer.ru/>

- 7 Сайт Пристинский В.Л. Холодильник, история изобретения и производства: [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.diagram.com.ua/info/engineering-and-technology/engineering-and-technology251.shtml>

Bibliograficheskiy spisok

1. SHpakovskij N.A. OTSM-TRIZ: podhody i praktika primeneniya: ucheb. posobie / N.A. SHpakovskij. – M.: INFRA-M, 2018. – 504 s.
2. 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.
3. Karlov A.G. Obosnovanie aktual'nosti i algoritma sistemnoj podgotovki specialistov proektirovaniya innovacionnoj tekhniki i tekhnologij / A.G. Karlov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashinopriborostroenii. – 2018. – № 3(7). – S. 26-43.
4. 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 mashinopriborostroenii. – 2018. – № 4(8). – S. 3-17.
5. Sajt kompanii Target Invention Ltd: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://solving-mill.com>
6. Sajt Obuchayushchaya sistema TRIZ-trener: [elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <https://triztrainer.ru/>
7. Sajt Pristinskij V.L. Holodil'nik, istoriya izobreteniya i proizvodstva: [elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.diagram.com.ua/info/engineering-and-technology/engineering-and-technology251.shtml>

¹Карлов Антон Георгиевич, к.т.н., доцент, antkar38cam@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Шпаковский Николай Андреевич, к.т.н., Мастер ТРИЗ, triztrainer@gmail.com, Беларусь, Минск, Target Invention Ltd

ANALYSIS OF OPTIONS FOR IMPROVING THE PRINTING QUALITY OF THE INJET PRINTER USING SOLVING MILL 2.0 SOFTWARE RESOURCES.

A.G. Karlov, N.A. Shpakovsky

An analysis of the features of the operation of an inkjet printer with a search for the reasons for the decline in print quality is presented. The analysis

was performed using the Solving Mill 2.0 software resources. The following problems are considered: an inkjet printer provides good print quality and has a relatively low cost, the best activator is considered to be a steam one, since it does not have moving parts, however, with an increase in the frequency of shooting drops of a steam inkjet printer, a disadvantage arises - the print is obtained with defects. The device of the printhead of an inkjet printer is considered (this is a container with ink, in the bottom of which there are cells in several rows that shoot ink droplets onto paper) and through the resources of the Solving Mill 2.0 software, the technology of inventive thinking is illustrated, which leads the problem solver to options for eliminating the mentioned disadvantage of an inkjet printer.

Keywords: theory of inventive problem solving (TRIZ), General Theory of Strong Thinking (OTSM), algorithm for correcting problem situations (AIPS), unwanted effect; harmful product, modeling of a useful system, harmful system modeling, print head of an inkjet printer, capillary for filling the chamber, ring heater

Karlov Anton Georgievich, candidate of technical sciences, docent, antkar38cam@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Shpakovsky Nikolay Andreevich, candidate of technical sciences, Master of TRIZ, triztrainer@gmail.com, Belarus, Minsk, Target Invention Ltd

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.², Мозолевкая Т.В.³

Аннотация. *Исследованы колебания физического маятника как элемента волновой энергетической установки при двухкомпонентном периодическом регулярном волновом воздействии с учетом случайных составляющих. Учитывается влияние нелинейности и демпфирования на динамическое поведение. Предложен простой способ изменения периода колебаний маятника.*

Ключевые слова. *Колебания линейных и нелинейных систем, решения дифференциальных уравнений, случайные воздействия, регулирование собственной частоты.*

Введение.

Теории колебаний линейных и нелинейных систем посвящена обширная литература [1–12] и другие. В ряде работ при исследовании сложного характера колебаний физически и геометрически нелинейных систем учитываются: свободные и вынужденные колебания, параметрические и автоколебания, случайный характер динамического воздействия. Методам исследования нелинейных колебаний механических систем при детерминированных и случайных воздействиях посвящены, например, работы [10,19,20].

Динамика нелинейных механических систем характеризуется рядом особенностей, существенно отличающихся от линейных систем. Для оценки динамики нелинейных систем обычно используются фазовые диаграммы, которые позволяют выявить особые точки устойчивого и неустойчивого равновесия.

Во многих объектах современной техники при их эксплуатации проявляются нелинейные свойства, отражающие сложный характер динамического поведения. Исследованию управляемых колебаний объектов посвящены работы [1–17].

В.В. Чебоксаровым предложена маятниковая волновая энергоустановка [18], предполагающая использование резонанса в нелинейной системе. Одна из упрощенных динамических моделей волновой энергоустановки рассмотрена в работе [19]: определены частоты собственных колебаний и исследованы колебания установки при периодических волновых воздействиях. Предварительные исследования показывают, что сам маятник, как основное звено энергоустановки, можно рассматривать как систему с одной степенью свободы при учете

детерминированных и случайных горизонтальных и вертикальных возмущений.

В зависимости от параметров маятника и воздействия при нелинейных колебаниях на фазовой плоскости отражаются особенности в виде устойчивых и неустойчивых центров и фокусов. В нелинейной системе, как известно, частота свободных колебаний зависит от начальных условий, а амплитуда колебаний – от частоты гармонического возмущения; при этом не исключается появление субгармонических колебаний и автоколебаний. В случае вертикальной составляющей воздействия возможен параметрический резонанс с потерей динамической устойчивости. Поэтому достижение устойчивости движения актуально для стабильной работы энергоустановки.

Цель исследований – анализ колебаний маятника как основного исполнительного органа волновой энергетической установки при детерминированных и случайных горизонтальных и вертикальных воздействиях.

1. Колебание маятника при горизонтальном перемещении точки подвеса ($x_e = a \sin pt$)

Уравнение, описывающее колебания маятника (Рис.1),

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{g}{L} \sin \varphi = \frac{ap^2}{L} \sin pt \cos \varphi, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести, L – длина маятника; a – амплитуда перемещения точки подвеса; p – частота кинематического возбуждения колебаний.

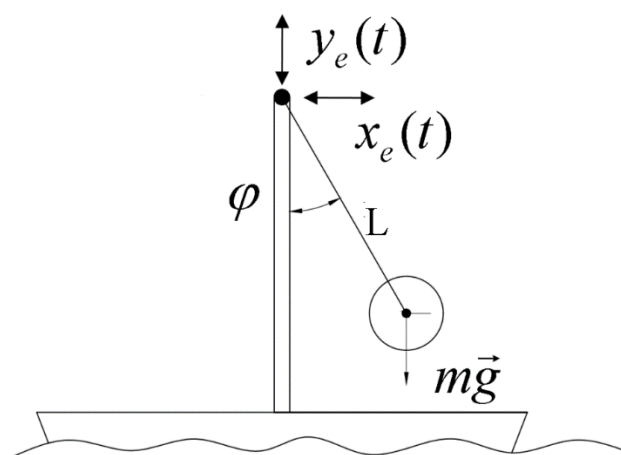


Рис.1 – Схема колебаний маятника

При малых колебаниях ($\sin \varphi \approx \varphi$ и $\cos \varphi \approx 1$) и начальных условиях $\varphi(0) = 0$, $\dot{\varphi}(0) = 0$ решение уравнения (1)

$$\varphi(t) = \frac{ap^2}{L(k^2 - p^2)} \left(\sin pt - \frac{p}{k} \cos kt \right). \quad (2)$$

Возможны оценки поведения маятника при резонансе, а также при случайных воздействиях. Численное интегрирование уравнения (1) выполнено в Mathcad.

Дальше приведена программа в Mathcad, графики $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$ при $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$ (колебания малые, без учета сопротивления).

$$L := 1 \quad A := 0.5 \quad p := 2 \cdot \pi \quad g := 9.80$$

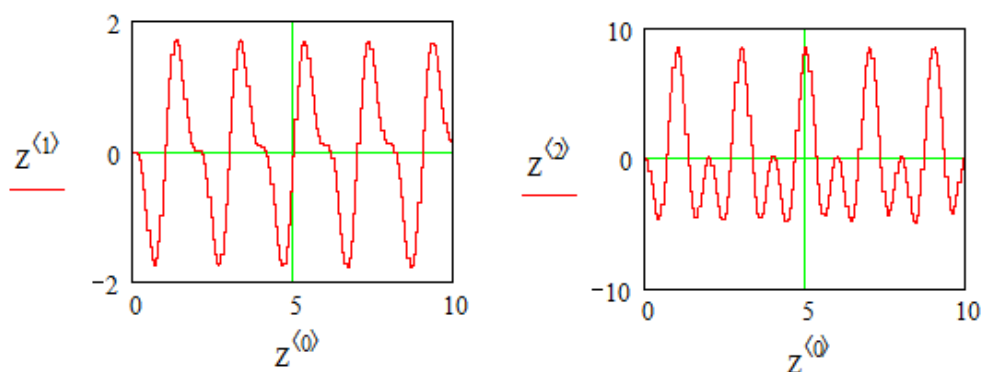
$$x := \begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.0 \end{pmatrix} \quad \omega_0 := \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \omega_0 = 3.13$$

$$k_1 := A \cdot \frac{p^2}{L} \quad T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_0} \quad T = 2.007 \quad k_2 := 0$$

$$k_1 = 19.739 \quad \omega_0^2 = 9.8$$

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ -\omega_0^2 \cdot (x_0) - k_1 \cdot \sin(p \cdot t) \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 10, 200000, D)$$



2. В Simulink для исследования влияния случайных возмущений на динамику маятника.

Создана модель, блок-схема которой изображена на Рис.2.

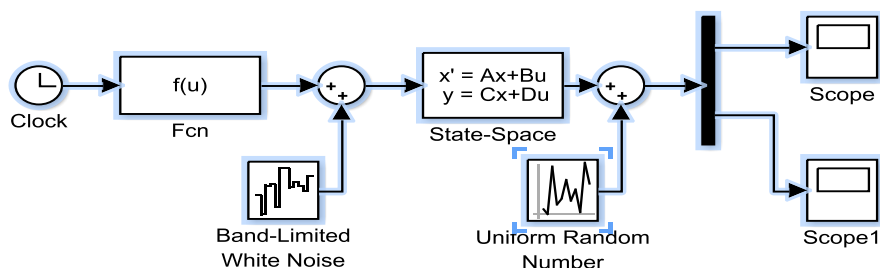


Рис.2 – Блок-схема численного интегрирования уравнения движения маятника

При гармоническом воздействии используются исходные данные для маятника и воздействие, применяемое ранее при численном интегрировании в Mathcad.

Модель в Simulink состоит из блоков: «Clock» – формирует сигнал значения текущего времени моделирования; «Fcn» – блок задания функции внешнего детерминированного воздействия; «State-Space» – численное интегрирование линейного дифференциального уравнения движения маятника (метод Рунга-Кутты); «Scope» – графическое отображение результатов интегрирования уравнений колебаний маятника.

Для задания случайных сигналов с равномерным и нормальным распределением использованы «Band-Limited White Noise» и «Uniform Random Number». На **Рис.3** и **Рис.4** приведены графики $\varphi(t)$ для регулярного воздействия и с учетом случайных возмущений.

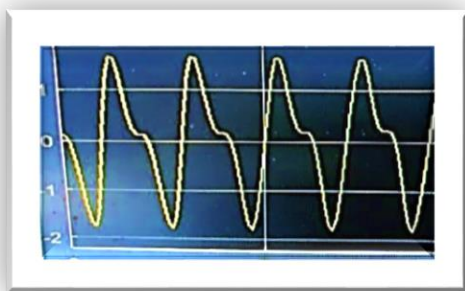


Рис.3 – Колебание маятника $\varphi(t)$ без учета случайных воздействий

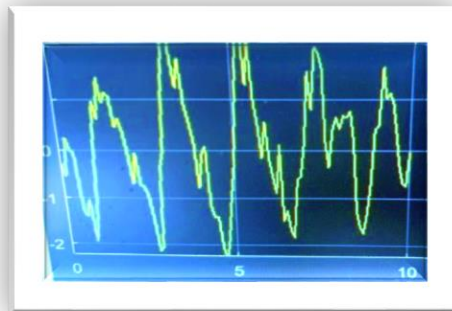


Рис.4 – Колебание маятника $\varphi(t)$ при учете случайных воздействий

3. Далее приведена программа нелинейных колебаний маятника при горизонтальном воздействии.

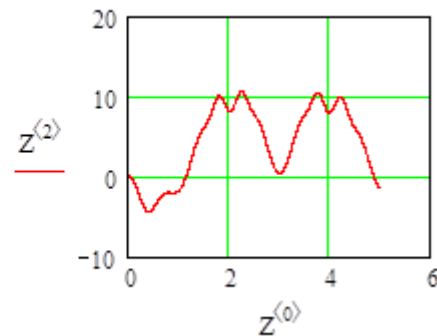
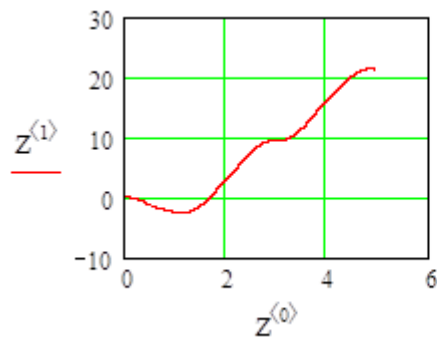
Линейно-вязкое сопротивление не учитывается; получены графики функций $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$.

$$L := 1 \quad A := 0.5 \quad p := 2 \cdot \pi \quad g := 9.80$$

$$x := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad \omega_0 := \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \omega_0 = 3.13 \quad k_1 := A \cdot \frac{p^2}{L} \quad T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_0} \quad T = 2.007$$

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -\omega_0^2 \cdot \sin(x_0) - k_1 \cdot \sin(p \cdot t) \cdot (\cos(x_0)) \end{pmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 5, 20000, D)$$



Из графиков следует, что при учете нелинейности не исключается потеря устойчивости маятника.

4. Нелинейные колебания маятника при: горизонтальном воздействии

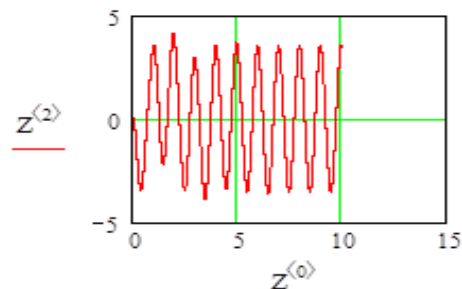
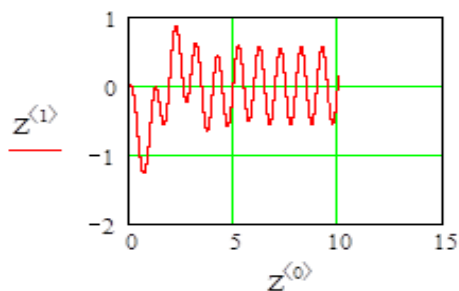
Учитывается линейно-вязкое сопротивление; получены графики $\phi(t)$ и $\dot{\phi}(t)$.

$$L := 1 \quad A := 0.5 \quad p := 2 \cdot \pi \quad g := 9.80$$

$$x := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad \omega_0 := \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \omega_0 = 3.13 \quad k_1 := A \cdot \frac{p^2}{L}$$

$$T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_0} \quad T = 2.007 \quad k_2 := \frac{\pi}{2}$$

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -\omega_0^2 \cdot \sin(x_0) - k_2 \cdot x_1 - k_1 \cdot \sin(p \cdot t) \cdot \cos(x_0) \end{pmatrix} \quad Z := \text{rkfixed}(x, 0, 10, 20000, D)$$



5. Нелинейные колебания маятника с учетом двух компонент воздействия (параметрический резонанс. Получены графики $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$)

$$L := 1 \quad A := 0.5 \quad p := 2 \cdot \pi \quad g := 9.80$$

$$x := \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad \omega_0 := \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \omega_0 = 3.13 \quad k_1 := A \cdot \frac{p^2}{L}$$

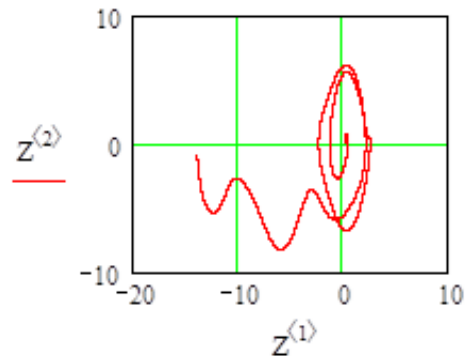
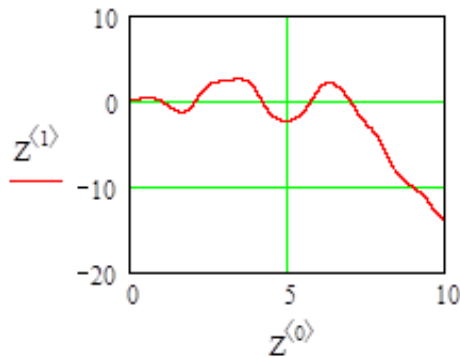
$$T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_0} \quad T = 2.007 \quad k_2 := \frac{\pi}{2}$$

$$k_3 := A \cdot \frac{\omega^2}{L} \quad T := 2 \cdot \frac{\pi}{\omega_0} \quad T = 2.007 \quad k_1 := 0.002 \cdot \omega_0$$

$$k_4 := k_3$$

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} x_1 \\ -k_1 \cdot x_1 - k_2 \cdot \sin(x_0) - k_3 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(x_0) + k_4 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(x_0) \end{pmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 10, 200000, D)$$



Важно отметить, что даже при учете сопротивления не исключается потеря устойчивости движения маятника.

В случае малых вертикальных колебаний уравнение движения маятника имеет вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{g}{L} + \frac{a \omega^2}{L} \cos \omega t \right) \varphi = 0. \quad (3)$$

При известной замене $\tau = \frac{\omega t}{2}$ следует уравнение Матье:

$$\frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + (\lambda + \nu \cos 2\tau) \varphi = 0, \quad (4)$$

В котором $\lambda = \frac{4\omega_0^2}{\omega^2}$, $\nu = \frac{4a}{L}$. Для сходных данных $\omega = 2\omega_0$, $\lambda = 1$; $a = 0,5\text{м}$, $\nu = 2$ согласно диаграмме Айнса-Стретта [7,9,10] точка с координатами $\lambda = 1$ и $\nu = 2$ надежно попадает в область устойчивости.

6. Период колебаний маятника $T = \frac{2\pi}{k}$ регулируется за счет изменения положения массы m_1 (Рис.5).

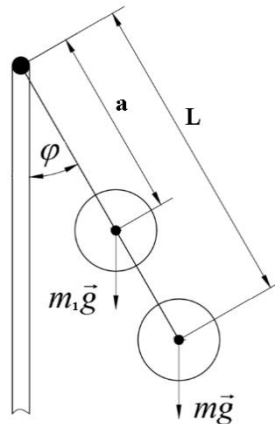


Рис.5 – Маятник с переменным положением массы m_1

Для заданных параметров (m, m_1, a, L) частота собственных колебаний вычисляется по формуле:

$$k = \sqrt{\frac{(m_1 a + mL)g}{m_1 a^2 + mL^2}}. \quad (5)$$

График функции $T = T(a)$ изображен на **Рис.6**. Период колебаний при $a = L/2$ равен $T = 1,587\text{с}$ и уменьшается на 24%. Меняя параметр a , можно изменять период колебаний с учетом периода регулярного волнового воздействия.

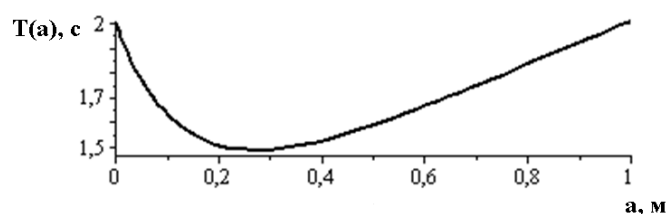


Рис.6 – Графики зависимости $T(a)$

Выводы:

1. Исследованы сложные вынужденные колебания маятника в резонансном режиме при учете горизонтальной и вертикальной составляющих регулярного и случайных воздействий.

2. Показано, что для поддержания резонансного состояния в некоторых пределах возможно изменение положения дополнительной массы (изменение ее расстояния от точки подвеса).

3. Дальнейшие исследования предполагают совершенствование конструкции физического маятника с учетом нагрузки от приводимого во вращения ротора электрогенератора при активном подавлении случайных колебаний.

Библиографический список

1. Андропов А.А. Теория колебаний / А.А. Андропов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1950. – 916 с.
2. Бутенин Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, П.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1976. – 256 с.
3. Боголюбов И.К. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / И.К. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – Изд. 2-е. – М.: Физматгиз, 1958. – 408 с.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Гостехиздат, 1958. – 628 с.
5. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем / В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
7. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний / В.П. Бидерман. – М.: Высш. школа, 1972. – 414 с.
8. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах. Т.1. Колебания линейных систем / Под. ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
9. Вибрации в технике. Справочник В 6-ти томах. Т.2. Колебание нелинейных механических систем, М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
10. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.
11. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высш. школа, 1973. – 454 с.
12. Мещерский И.В. Задачи по теоретической механике: Учебное пособие для вузов / И.В. Мещерский. – 38-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 448 с.
13. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.Н. Мозолевский. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
14. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 212 с.

15. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016.–174с.
16. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Г.И. Варминская. – Издательство: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
17. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов: учебное пособие / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
18. Чебоксаров В.В. Сравнительный анализ эффективности двух схем маятниковых преобразователей энергии волн / В.В. Чебоксаров // Энергетические установки и технологии. – 2016. Т2. №1. – С. 68 – 75.
19. Бохонский А.И. Упрощённая динамическая модель волновой энергоустановки / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, В.В. Чебоксаров // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – Вып. №1 (17), 2022. С. 20 – 24.
20. Вибрации в технике: Справочник. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Andropov A.A. Teoriya kolebanij / A.A. Andropov, A.A. Vitt, S.E. Hajkin. – М.: Fizmatgiz, 1950. – 916 s.
2. Butenin N.V. Vvedenie v teoriyu nelinejnyh kolebanij / N.V. Butenin, YU.I. Nejmark, P.A. Fufaev. – М.: Nauka, 1976. – 256 s.
3. Bogolyubov I.K. Asimptoticheskie metody v teorii nelinejnyh kolebanij / I.K. Bogolyubov, YU.A. Mitropol'skij. – Izd. 2-e. – М.: Fizmatgiz, 1958. – 408 s.
4. Babakov I.M. Teoriya kolebanij / I.M. Babakov. – М.: Gostekhizdat, 1958. – 628 s.
5. Svetlickij V.A. Sluchajnye kolebaniya mekhanicheskikh sistem / V.A. Svetlickij. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 216 s.
6. Panovko YA.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara / YA.G. Panovko. – L.: Mashinostroenie, 1976. – 320 s.
7. Biderman V.P. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij / V.P. Biderman. – М.: Vyssh. shkola, 1972. – 414 s.
8. Vibracii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti tomah. T.1. Kolebaniya linejnyh sistem / Pod. red. V.V. Bolotina. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 352 s.
9. Vibracii v tekhnike. Spravochnik V 6-ti tomah. T.2. Kolebanie nelinejnyh mahanicheskikh sistem , М.: Mashinostroenie, 1979. – 351 s.
10. Bolotin V.V. Dinamicheskaya ustojchivost' uprugih sistem. М.: Gostekhizdat, 1956. – 600 s.

11. Svetlickij V.A. Sbornik zadach po teorii kolebanij / V.A. Svetlickij, I.V. Stacenko. – M.: Vyssh. shkola, 1973. – 454 s.
12. Meshcherskij I.V. Zadachi po teoreticheskoy mekhanike: Uchebnoe posobie dlya vuzov / I.V. Meshcherskij. – 38-e izd. – SPb.: Lan', 2010. – 448 s.
13. Bohonskij A.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemykh ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya/ A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, M.N. Mozolevskij. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 s.
14. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 212 s.
15. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2016.–174s.
16. Bohonskij A.I. Konstruirovanie optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bohonskij, G.I. Varminskaya. – Izdatel'stvo: NIC MS, 2020. – 120 s.
17. Bohonskij A.I. Mekhanika upravlyaemogo dvizheniya ob"ektov: uchebnoe posobie / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya. – M.: INFRA-M, 2021. – 170 s.
18. CHEbokrsarov V.V. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti dvuh skhem mayatnikovyyh preobrazovatelej energii voln / V.V. CHEbokrsarov // Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. – 2016. T2. №1. – S. 68 – 75.
19. Bohonskij A.I. Uproshchyonnaya dinamicheskaya model' volnovoј energoustanovki / A.I. Bohonskij, M.M. Majstrishin, V.V. CHEbokrsarov // Avtomatizaciya i izmereniya v mashino- priborostroenii. – Vyp. №1 (17), 2022. S. 20 – 24.
20. Vibracii v tekhnike: Spravochnik. T.2. Kolebaniya nelinejnyh mekhanicheskikh sistem / Pod red. I.I. Blekhmana. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 351 s.

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

²*Майстришин Михаил Михайлович, к.т.н., доцент, mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Мозолева Татьяна Викторовна, к.т.н., доцент, доцент Черноморского высшего военно-морского ордена Красной Звезды училища имени П. С. Нахимова.*

POWER PLANT

A.I. Bokhonskiy, M.M. Maystrishin, T.V. Mozolevkaya

Oscillations of a physical pendulum as an element of a wave power plant with a two-component periodic regular wave action are studied, taking into account the random components of the action. The effect of nonlinearity and damping on the dynamic behavior of the pendulum is taken into account. A simple method is proposed for changing the period of oscillation of the pendulum.

Keywords: oscillations of linear and non-linear systems, analytical and numerical solutions of equations, random influences, regulation of natural frequency.

Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Maystrishin Mikhail Mikhaylovich, candidate of technical science, docent, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol state University

Mozolevskaya Tatyana Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, of the Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after PS Nakhimov.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

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

Аннотация. Рассматривается метод построения на ЭВМ областей в пространстве параметра линейных систем автоматического управления (САУ), внутри которых значение прямого показателя качества – времени регулирования, лежит в заданных пределах. Предлагается определять эти области по положительным вещественным корням определенным образом построенных алгебраических уравнений, что не требует перебора значений частотных и временных характеристик, тем самым не требует их непосредственного построения. Предлагаемое решение задачи позволяет полностью автоматизировать процесс получения результата и существенно уменьшить время предварительной оценки качества САУ.

Ключевые слова. Линейная система автоматического управления, прямые показатели качества, время регулирования, область качества

Постановка проблемы

При синтезе САУ, когда требуется определить влияние значений каких-либо варьируемых параметров на устойчивость, строят область (области) устойчивости в пространстве этих варьируемых параметров. В дальнейшем, при необходимости, внутри полученной области строят подобласть качества с требуемыми (гарантированными) характеристиками, к которым относится и прямой показатель качества – время регулирования, характеризующий быстродействие САУ. То есть, как при анализе, так и при синтезе системы управления, одного факта устойчивости недостаточно. Необходимо еще оценить качество ее работы, то есть, насколько выполняются те или иные специализированные показатели (например, время регулирования, перерегулирование, показатель колебательности и т.п.) или критерии. Система, которая является устойчивой, на практике может быть непригодной для решения конкретных задач автоматического управления, так как ее показатели качества не удовлетворяют требованиям этих задач.

При построении областей устойчивости САУ на ЭВМ используются как поисковые методы, так и классические [1,7], но машинно-адаптированные частотные методы D-разбиения. Для выделения внутри областей устойчивости подобластей с необходимыми прямыми показателями качества применяется многократное построение и анализ при различных значениях варьируемых параметров кривой переходного процесса. Областью качества САУ является область, внутри которой время

регулирования и (или) перерегулирование лежат в заданных пределах значений.

Для определения прямых показателей качества линейных непрерывных САУ применяются методы, в основе которых лежит поточечное построение и анализ переходных процессов [1,2]. Эти методы хорошо известны, но в ряде случаев не гарантируют результат из-за трудностей построения кривых переходных процессов САУ, имеющих сложную структуру или высокий порядок. Альтернативой таким методам является метод оценки прямых показателей качества, основанный на применении номограмм В.В. Солодовникова [1,2,9], который требует построения и анализа вещественной частотной характеристики (ВЧХ) замкнутой системы [1,2,9]. Несмотря на то, что построение ВЧХ является гораздо более простой задачей, чем построение переходного процесса, в ряде случаев и для сложных систем ее достаточно проблематично построить точно. В свою очередь, для оценки прямых показателей качества САУ методом В.В. Солодовникова нужна не вся ВЧХ, а лишь ее отдельные точки.

Будем рассматривать задачу параметрического анализа на ЭВМ быстродействия САУ, то есть задачу построения областей с необходимым временем регулирования в пространстве одного варьируемого параметра линейной замкнутой системы с помощью простого, но, как показывает практика, достаточно эффективного метода, основанного на алгебраическом анализе ВЧХ.

Цель статьи.

Целью статьи является разработка экспресс метода построения на ЭВМ областей требуемого времени регулирования САУ на основе Д-разбиения и ВЧХ по положительным вещественным решениям алгебраических уравнений, то есть не требующего построения частотных характеристик. Таким образом, решение задачи сводится к алгебраизации классических частотных методов теории автоматического управления. Необходимо отметить, что такой алгебраический подход к решению задач автоматического управления может быть применим для построения областей устойчивости и качества САУ [8], анализа косвенных показателей качества [3], исследования устойчивости САУ [4], анализа периодических режимов в нелинейных системах [5], анализа абсолютной устойчивости нелинейных САУ по критерию Попова [6].

Предлагаемый в статье алгебраический метод позволяет в бесконечном множестве точек варьируемого параметра САУ установить те, которые определяют границы областей требуемого времени регулирования. Следует отметить, что данный метод, в силу его

специфики, применяется на начальном этапе исследования САУ, так как не всегда обеспечивает высокую точность результата.

Построение областей требуемого быстродействия на основе применения положительных вещественных решений алгебраических уравнений

Рассматривается случай линейной зависимости от одного варьируемого параметра α числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой САУ. Такая передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = \frac{c(s) + \alpha v(s)}{a(s) + \alpha b(s)}, \quad (1)$$

где $c(s)$, $v(s)$, $a(s)$, $b(s)$ - полиномы с вещественными коэффициентами.

Прямые показатели качества САУ определяются только для устойчивых систем, поэтому на первом этапе строим области (интервалы) устойчивости в пространстве параметра α . Для этого применим метод, описанный в [8].

По передаточной функции (1) запишем характеристический полином замкнутой САУ:

$$D(s) = a(s) + \alpha b(s). \quad (2)$$

Решение данной задачи удовлетворяет уравнению:

$$\operatorname{Im}\{-a(j\omega) / b(j\omega)\} = 0.$$

Подставим в полином (2) вместо s мнимую переменную $j\omega$ и выделим варьируемый параметр:

$$\alpha(j\omega) = -a(j\omega) / b(j\omega). \quad (3)$$

Представим (3) в виде

$$\alpha(j\omega) = \frac{r(\omega)}{z(\omega)} + j \frac{m(\omega)}{z(\omega)}, \quad (4)$$

где $r(\omega)$, $m(\omega)$ и $z(\omega)$ – полиномы с вещественными коэффициентами.

Для выделения интервалов устойчивости и неустойчивости САУ по параметру α вычислим вещественные неотрицательные корни и их кратности полиномов числителя и знаменателя мнимой части выражения (4).

Для определения границ интервалов осуществляем перебор корней полинома числителя $m(\omega)$ и сравниваем очередной корень числителя с корнями полинома знаменателя $z(\omega)$. Исключаем совпадающие корни с учетом их кратности. Оставшиеся после исключения корни полинома

$m(\omega)$, которые являются частотами пересечения годографа D-разбиения с вещественной осью, подставляем в действительную часть выражения (4) и определяем границы интервалов «претендентов» на устойчивость. Упорядочиваем полученные границы варьируемого параметра α по возрастанию, добавляем к ним нижнюю и верхнюю предельные границы (соответствующие $\alpha=-\infty$ и $\alpha=+\infty$) и формируем сами интервалы «претенденты» на устойчивость.

Далее, для каждого интервала определяем устойчивость характеристического полинома $D(s)=a(s)+\alpha_c b(s)$, где α_c – среднее значение интервала, с помощью любого алгебраического критерия устойчивости (например, Рауса). Если полином $D(s)$ устойчив, то и весь интервал изменения параметра является интервалом устойчивости САУ.

На втором этапе строим искомые подобласти (интервалы) требуемого времени регулирования в пространстве параметра α внутри полученных интервалов устойчивости.

Сначала рассмотрим, как алгебраическим методом (без непосредственного построения ВЧХ) определить время регулирования при некотором фиксированном значении α из интервала устойчивости, полученного на первом этапе.

Подставив такое α в передаточную функцию (1), можно записать ее в виде

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (5)$$

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

Как было сказано выше, в основу рассматриваемого метода анализа прямых показателей качества положена методика приближенной оценки вида переходного процесса по ВЧХ замкнутой устойчивой САУ [9]. На основании расчетов переходных процессов по ВЧХ В.В. Солодовников предложил оценивать показатели качества — перерегулирование σ и время регулирования t_p в зависимости от величины максимума ВЧХ P_{max} , заданной на интервале положительности ω_n [1, 9].

ВЧХ на интервале положительности разбивается на две трапеции, как это показано на **Рис.1**. Далее определяются частоты в точках излома аппроксимирующих прямых, по которым находятся следующие параметры: $\chi = \omega_d / \omega_o$ — основной коэффициент наклона; $\chi_a = \omega_a / \omega_b$ — дополнительный коэффициент наклона; $\lambda = \omega_b / \omega_o$ — коэффициент формы. В зависимости от этих параметров были составлены две номограммы [7,9]:

номограмма А — для $\chi \leq 0.8; \chi_a \geq 0.4; \lambda \geq 0.5$ и номограмма В — для $\chi \leq 0.8; \chi_a \leq 0.4; 0.1 \leq \lambda \leq 0.5$. Исследования показали, что номограмма А соответствует САУ, имеющим астатизм первого порядка, а номограмма В — статическим системам [10]. Пользуясь этими номограммами и, зная P_{max} и частоту положительности ω_n можно найти $\sigma = f(P_{max})$ и $t_p = k\pi/\omega_n$. Номограммы В.В. Солодовникова легко программируются на ЭВМ, так как имеют близкий к линейному характер изменения.

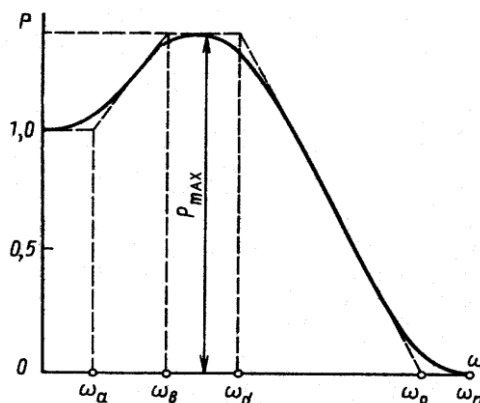


Рис.1 – Разбиение вещественной частотной характеристики на две трапеции

Во многих практических случаях ВЧХ имеет, кроме положительного, отрицательный экстремум P_{min} . Такая характеристика в первом приближении может быть аппроксимирована тремя трапециями [2]. Отрицательная часть ВЧХ влияет в основном на перерегулирование, увеличивая его [1].

Выражение для построения ВЧХ $P(\omega)$ имеет вид:

$$P(\omega) = \operatorname{Re}(W(j\omega)).$$

Заменив в (5) s на $j\omega$, получим

$$W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{c_1(\omega) + jc_2(\omega)}{z_1(\omega) + jz_2(\omega)} = \frac{C_u(\omega)}{Z(\omega)} + j \frac{C_v(\omega)}{Z(\omega)},$$

где $c_1(\omega)$, $c_2(\omega)$, $z_1(\omega)$, $z_2(\omega)$, $C_u(\omega)$, $C_v(\omega)$, $Z(\omega)$ — полиномы с вещественными коэффициентами.

Тогда выражение для построения ВЧХ примет вид

$$P(\omega) = \frac{C_u(\omega)}{Z(\omega)},$$

а для вычисления ее экстремумов необходимо решить уравнение:

$$\frac{d\left(\frac{C_u(\omega)}{Z(\omega)}\right)}{d\omega} = 0 \Leftrightarrow \Leftrightarrow \frac{C_u'(\omega)Z(\omega) - Z'(\omega)C_u(\omega)}{Z^2(\omega)} = 0. \quad (6)$$

Вычислим вещественные неотрицательные корни и их кратности полиномов числителя и знаменателя уравнения (6). Исключаем совпадающие корни с учетом их кратности. Очевидно, что оставшиеся после исключения корни уравнения

$$C_u'(\omega)Z(\omega) - Z'(\omega)C_u(\omega) = 0 \quad (7)$$

будут соответствовать частотам ω , на которых производная $\frac{dP(\omega)}{d\omega}$ обращается в ноль, то есть частотам экстремумов.

Значение частоты положительности ω_{Π} соответствует частоте, на которой ВЧХ первый раз пересекает ось абсцисс, то есть когда $P(\omega)=0$. Однако, для некоторых случаев вида ВЧХ, значение $P(\omega)$ может быть равно 0 при $\omega \rightarrow \infty$. Поэтому, значение ω_{Π} на ЭВМ будем определять не точкой пересечения ВЧХ с частотной осью, а точкой ее пересечения с горизонтальной прямой, проходящей над частотной осью на уровне ε , где ε достаточно мало. Таким образом частота ω_{Π} будет полностью определяться решением уравнения:

$$C_u(\omega) - Z(\omega)\varepsilon = 0. \quad (8)$$

Наименьший положительный вещественный корень уравнения (8) будет соответствовать частоте положительности ω_{Π} .

Если уравнение (7) не имеет положительных вещественных решений (с учетом исключения совпадающих с корнями полинома знаменателя (6)), то ВЧХ не имеет экстремумов и значение $P_{\max} = P(0)$.

Если уравнение (7) имеет положительные вещественные корни (с учетом исключения совпадающих с корнями полинома знаменателя (6)) $\omega_1 < \omega_2 < \dots$, то необходимо осуществить проверку условия

$$\frac{C_u(\omega_1)}{Z(\omega_1)} > 0.$$

При выполнении этого условия значение $P_{\max} = P(\omega_1)$. В противном случае значение $P_{\max} = P(0)$.

Для построения на ЭВМ в пространстве варьируемого параметра α областей (интервалов) требуемого времени регулирования был разработан алгоритм, основанный на равномерном поиске. Требуемое время регулирования t_p должно удовлетворять неравенству:

$$t_{\min} \leq t_p \leq t_{\max}, \quad (9)$$

где $t_{\min}$ — минимально допустимое время регулирования, $t_{\max}$ — максимально допустимое время регулирования,

Рассмотрим этот алгоритм для одного интервала устойчивости САУ, полученного на первом этапе.

Шаг 1. Задаем начальное значение варьируемого параметра α_n (α_n — левая граница интервала устойчивости САУ), конечное значение варьируемого параметра α_p (α_p — правая граница интервала устойчивости САУ), максимально допустимый шаг изменения варьируемого параметра (максимальный шаг поиска) $h_{\max}$, который определяет минимальную точность вычисления границ интервалов требуемого времени регулирования.

Обозначим границы искомым интервалов требуемого времени регулирования как G_s^m , где s — номер интервала, а m — номер границы интервала (для левой границы он равен 1, для правой он равен 2).

Шаг 2. Задаем количество точек поиска u .

Шаг 3. Вычисляем шаг изменения варьируемого параметра (шаг поиска) $h_\alpha = (\alpha_p - \alpha_n)/(u-1)$.

Шаг 4. Выполняем проверку: если $h_\alpha > h_{\max}$, то положим $u = 1.5u$ и переходим к шагу 3, иначе переходим к шагу 5.

Шаг 5. Задаем $\alpha = \alpha_n$. Вычисляем при заданном α значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (1). Определяем при этом значении параметра время регулирования t_p методом, рассмотренным выше. Если оно удовлетворяет неравенству (9), то задаем $d_1 = 0$, иначе задаем $d_1 = 1$.

Положим $m = 1$, $s = 1$.

Выполняем проверку: если $d_1 = 0$, то $G_s^m = \alpha$ и $m = 2$.

Шаг 6. Задаем новое значение $\alpha = \alpha + h_\alpha$.

Выполняем проверку: если $\alpha > \alpha_p + h_\alpha/2$, процесс определения подынтервалов требуемого времени регулирования САУ на данном интервале завершается. При этом, если $d_1 = 0$ и $d_2 = 0$, то $m = 2$ и $G_s^m = \alpha - h_\alpha$.

Шаг 7. Вычисляем при текущем значении α значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (1). Определяем время регулирования t_p методом, рассмотренным выше. Если оно удовлетворяет неравенству (9), то задаем $d_2=0$, иначе задаем $d_2=1$.

Шаг 8. Выполняем проверку:

- а) если $d_1=1$ и $d_2=1$, то переходим к шагу 6;
- б) если $d_1=0$ и $d_2=0$, то переходим к шагу 6;
- в) если $d_1=0$, а $d_2=1$, то переходим к шагу 9;
- г) если $d_1=1$ и $d_2=0$, то переходим к шагу 10.

Шаг 9. $G_s^m = \alpha - h_\alpha$. Положим $d_1=d_2$, $m=1$, $s=s+1$ и переходим к шагу 6.

Шаг 10. $G_s^m = \alpha$. Положим $d_1=d_2$, $m=2$ и переходим к шагу 6.

Выводы.

Предлагаемый машинно-ориентированный метод позволяет на первичном этапе исследования полностью автоматизировать построение оценочных областей требуемого времени регулирования в пространстве параметра линейных САУ. Рассмотренный метод существенно упрощает и улучшает параметрический анализ на ЭВМ качества линейных САУ, имеющих высокий порядок или сложную структуру, так как не требует непосредственного построения годографа D-разбиения и ВЧХ или переходных процессов. Он основан на вычислении и анализе положительных вещественных решений алгебраических уравнений, которые, в отличие от комплексных решений, определяются на ЭВМ численными методами с высокой надежностью и скоростью даже для уравнений высоких (до сорокового) порядков. Дальнейшие исследования по данной тематике связаны с разработкой эффективного программного обеспечения.

Библиографический список

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов – М.: Наука, 1972. – 767 с.
2. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – 584 с.
3. Грушун А.И. Машинно-ориентированный метод определения полосы пропускания линейных стационарных систем автоматического управления / А.И. Грушун // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. – Севастополь: изд-во СевГТУ, 1996. – Вып. 2. – С.65 – 68.
4. Грушун А.И. Алгебраический подход к анализу устойчивости систем управления по критерию Найквиста / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении: научный журнал, 2022

- Автоматизация процессов и управление: сб.науч. тр. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2003. – Вып. 49. – С.211 – 215.
5. Грушун А.И. Анализ на ЭВМ автоколебаний в нелинейных системах автоматического управления на основе метода гармонического баланса / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Автоматизация процессов и управление: сб.науч. тр. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2014. – Вып. 146. – С.223–226.
 6. Грушун А.И. Анализ на ЭВМ абсолютной устойчивости нелинейных систем управления на основе метода В.М. Попова / А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Информационные технологии и управление: сб.науч. тр. – Севастополь: изд-во СевГУ, 2015. – Вып. 1. – С.119– 125.
 7. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование / Н.Н. Иващенко – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
 8. Пряшников Ф.Д. Проблема применения репрезентативных множеств в задачах построения областей устойчивости и качества динамических систем управления / Ф.Д. Пряшников, А.И. Грушун, Т.А. Грушун // Динамические системы. – К.: Лыбидь, 1994. – №13 – С.16 – 20.
 9. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / В.В.Солодовников [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – Кн.1. – 769 с.
 10. Топчеев Ю.М. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю.А. Топчеев. – М.: Машиностроение, 1989. – 751 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Besekerskij V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.A. Besekerskij, E.P.Popov – М.: Nauka, 1972. – 767 s.
2. Voronov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnyh linejnyh sistem / A.A. Voronov. – М.: Energiya, 1980. – 584 s.
3. Grushun A.I. Mashinno-orientirovannyj metod opredeleniya polosy propuskaniya linejnyh stacionarnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya / A.I. Grushun // Vestnik SevGTU: sb. nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevGTU, 1996. – Vyp. 2. – S.65 – 68.
4. Grushun A.I. Algebraicheskij podhod k analizu ustojchivosti sistem upravleniya po kriteriyu Najkvista / A.I. Grushun, T.A. Grushun // Avtomatizaciya processov i upravlenie: sb.nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevNTU, 2003. – Vyp. 49. – S.211 – 215.
5. Grushun A.I. Analiz na EVM avtokolebanij v nelinejnyh sistemah avtomaticheskogo upravleniya na osnove metoda garmonicheskogo balansa / A.I. Grushun, T.A. Grushun // Avtomatizaciya processov i upravlenie: sb.nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevNTU, 2014. – Vyp. 146. – S.223– 226.

6. Grushun A.I. Analiz na EVM absolyutnoj ustojchivosti nelinejnyh sistem upravleniya na osnove metoda V.M. Popova / A.I. Grushun, T.A. Grushun // Informacionnye tekhnologii i upravlenie: sb.nauch. tr. – Sevastopol': izd-vo SevGU, 2015. – Vyp. 1. – S.119– 125.
7. Ivashchenko N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie / N.N. Ivashchenko – М.: Mashinostroenie, 1978. – 736 s.
8. Pryashnikov F.D. Problema primeneniya reprezentativnyh mnozhestv v zadachah postroeniya oblastej ustojchivosti i kachestva dinamicheskikh sistem upravleniya / F.D. Pryashnikov, A.I. Grushun, T.A. Grushun // Dinamicheskie sistemy. – К.: Lybid', 1994. – №13 – S.16 – 20.
9. Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V.Solodovnikov [i dr.]. – М.: Mashinostroenie, 1967. – Кн.1. – 769 s.
10. Topcheev YU.M. Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / YU.A. Topcheev. – М.: Mashinostroenie, 1989. – 751 s.

¹*Грушун Андрей Иванович, канд. техн. наук, доц., a.gran69@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Грушун Татьяна Александровна, к.т.н., доцент, gai_gta@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Осадченко Александр Евгеньевич, к.т.н., доцент, aeosadchenko@rambler.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

PARAMETRIC ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

A.I. Grushun, T.A. Grushun, A.E.Osadchenko

A method for constructing on a computer areas in the parameter space of linear automatic control systems is considered, within which the value of the direct quality indicator - the control time, lies within the specified limits. It is proposed to determine these areas by positive real roots of algebraic equations constructed in a certain way, which does not require enumeration of the values of frequency and time characteristics, thus does not require their direct construction. The proposed solution to the problem allows you to fully automate the process of obtaining the result and significantly reduce the time of preliminary assessment of the quality of the automatic control systems.

Key words: linear automatic control system, direct indicators of quality, control time, quality area, positive real roots.

*Grushun Andrey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent,
a.gran69@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Grushun Tatiana Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent,
gai_gta@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Osadchenko Alexander Evgenievich, candidate of technical sciences,
aeosadchenko@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

АППАРАТ ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ СО СТРУЙНЫМ ОКСИГЕНАТОРОМ ДЫХАТЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Поливцев В.П.¹, Пашков Е.В.², Поливцев В.В.³

Аннотация. Приведены результаты анализа конструкций и функциональных возможностей ряда относящихся к медицинской технике аппаратов искусственного жидкостного дыхания. Приведены принципиальная схема, описание конструкции и принцип работы аппарата, содержащего трубопроводы контуров вдоха, выдоха и подготовки дыхательной жидкости со встроенными в них электромагнитными клапанами, насосами, фильтром, эластичными камерами, обеззараживающей камерой, оксигенатором с дозатором кислорода и электрическим термостатом, ультразвуковой камерой, а также с подключенными к блоку управления устройствами для измерения параметров циркуляции жидкости. Повышение надежности насыщения жидкости кислородом достигается ее перемешиванием с поступающим из дозатора кислородом с помощью входящего в состав дозатора инжектора на базе трубки Вентури. Дозатор выполнен в виде диска, являющегося дном оксигенатора, снабженного центральным отверстием, в котором закреплен конец конического диффузора инжектора, в котором установлен конический разделитель потока дыхательной жидкости со спиральными канавками, а по периферии диска выполнены отверстия со вставками из пористого материала для подачи кислорода. Спиральные канавки создают в полости камеры оксигенатора перемещающиеся с высокой скоростью (эффект Вентури) по траекториям в виде расходящихся винтовых спиралей потоки жидкости, вызывая рост интенсивности перемешивания дыхательной жидкости, что повышает надежность ее насыщения кислородом до нужного уровня, уменьшает время достижения этого уровня и расход кислорода.

Ключевые слова. Дыхательная жидкость, оксигенатор, инжектор, дозатор кислорода, спиральный канал, винтовой поток жидкости.

Введение.

Цель исследований заключается в повышении надежности насыщения кислородом циркулирующей по трубопроводам контуров вдоха и выдоха дыхательной жидкости аппаратов жидкостного дыхания.

Разработанный аппарат относится к медицинской технике, а именно, к аппаратам искусственного дыхания, т.е. вентиляции легких, используемых в условиях нормо- или гипербарии.

Известен модуль жидкостного дыхания в условиях гипербарии для модельного биообъекта [1], содержащий пульсирующий насос с контурами вдоха и выдоха на базе сильфонов, соединительные трубопроводы с

электромагнитными пневмораспределителями для кислорода и гидрораспределителями для дыхательной жидкости, фильтр, регенератор углекислого газа, датчик кислорода, емкость для дыхательной жидкости с упругим дном в виде сильфона, баллон сжатого кислорода, оксигенатор и блок управления.

К недостаткам модуля следует отнести сложность конструкции, большой расход кислорода, используемого не только для оксигенации, но и в качестве энергоносителя для пульсирующего сильфонного насоса, некачественная очистка дыхательной жидкости из-за отсутствия возможности удаления из нее азота, накопление которого в организме биообъекта приводит к кессонной болезни, что сужает его функциональные возможности.

Известен аппарат жидкостного дыхания [2], содержащий дозировочный насос с приводом и блоком управления, поглотитель углекислоты, оксигенатор, стабилизатор температуры (термостат), дозатор кислорода, клапан избыточного давления, электромагнитные клапаны и присоединительные элементы (трубопроводы), к недостаткам которого следует отнести ограниченные функциональные возможности и невысокое качество очистки дыхательной жидкости вследствие невозможности удаления из выдыхаемой дыхательной жидкости растворенного в ней азота, а также необходимость иметь дополнительный источник сжатого воздуха для работы дозатора.

Известный аппарат вентиляции легких жидкостью [3] содержит мембранный насос, бак-накопитель для дыхательной жидкости с оксигенатором и термостатом, автоматические электромагнитные клапаны, блок управления и систему циркуляции дыхательной жидкости в виде двух контуров – контура подготовки дыхательной жидкости и совмещенного контура ее закачки и удаления, т.е. контура вдоха/выдоха.

К его недостаткам следует отнести ограниченные функциональные возможности вследствие неспособности удаления из выдыхаемой дыхательной жидкости растворенного в ней азота и углекислого газа, а также осуществления ее обеззараживания (дебактеризации). Кроме того, вследствие совмещения контуров вдоха и выдоха с использованием одного насоса, в подготовленную (оксигенированную) жидкость контура вдоха не исключается попадание выдыхаемой жидкости, что негативно отражается на ее качестве. Также, вследствие совмещения контуров вдоха и выдоха отсутствует возможность независимого изменения параметров циркуляции жидкости через эти контуры, таких как давление, расход, объем, что ограничивает функциональные возможности аппарата в целом.

В статье [4] отражены общие вопросы использования жидкостного дыхания, связанные с ним проблемы и пути их решения.

В аппарате жидкостного дыхания [5] используется оксигенатор пузырькового типа с дозатором кислорода в виде перфорированной мембраны. При свободном всплытии выделяемых через отверстия мембраны пузырьков кислорода не обеспечивается их надежное перемешивание для лучшего растворения с жидкостью, т.е. надежное насыщение жидкости кислородом.

Задачами, для решения которых предназначено предлагаемое техническое решение, являются расширение функциональных возможностей аппаратов жидкостного дыхания, направленных на повышение качества подготовки циркулирующей через их контуры вдоха и выдоха дыхательной жидкости, в частности, путем надежного ее насыщения кислородом.

Результаты работы.

Аппарат жидкостного дыхания основан на использовании замкнутой системы циркуляции дыхательной жидкости, которая включает три функционально независимых контура – контур подготовки жидкости, контур вдоха и контур выдоха, поскольку параметры циркулирующей через них жидкости, такие как давление, расход, температура и объем, не связаны между собой и не влияют друг на друга.

Контур подготовки жидкости содержит перекачивающий лопастной насос 1 (**Рис.1,а**), вход которого, посредством трубопровода 2 с последовательно встроенными в него обеззараживающей камерой 3 (например, ультрафиолетовой) и фильтром 4, соединен с трубопроводом 5 контура выдоха с последовательно встроенными в него накопительной эластичной емкости 6 в виде упругой оболочки для использованной выдыхаемой жидкости, откачивающим лопастным насосом 7, датчиком расхода 8 и отсечным электромагнитным клапаном 9.

Выход перекачивающего насоса, посредством трубопровода 48 с последовательно встроенными в него вертикально расположенной цилиндрической герметичной камеры 45 для ультразвуковой проточной обработки жидкости (Патент РФ 141803), снабженной источником ультразвукового воздействия с генератором электрических ультразвуковых колебаний 44 и акустически связанных преобразователя электрических колебаний в механические (например, пьезоэлектрического), ступенчатого концентратора колебаний 46 и рабочего инструмента (излучателя) в форме диска 47, и далее, регулируемым дросселем 41 и камерой оксигенатора 20, охваченной снаружи спиральным нагревательным элементом электрического термостата 23, соединен с трубопроводом 18 контура вдоха с последовательно встроенными в него датчиком температуры 17,

накопительной эластичной емкостью 16 для подготовленной вдыхаемой жидкости, аналогичной емкости для выдыхаемой жидкости, основным 14 и вспомогательным 15 закачивающими лопастными насосами, датчиком расхода 13, датчиком давления 12 и отсечным электромагнитным клапаном 11.

Выход и вход трубопроводов соответственно контуров вдоха и выдоха соединены между собой и с переходником 10 для установки эндотрахеальной трубки.

Упомянутая выше камера оксигенатора, выполнена в виде цилиндрической герметичной вертикально расположенной емкости с патрубком 40 для подвода дыхательной жидкости и дозатором кислорода в ее нижней части, а также с патрубком 19 отвода жидкости, ультразвуковым датчиком уровня 21 и патрубком для установки обратного (предохранительного) клапана 22 в ее верхней части.

Дозатор кислорода выполнен в виде диска 24 (**Рис.1,б**), являющегося дном камеры оксигенатора, снабженного центральным отверстием 49, в котором закреплен конец большего диаметра конического диффузора 25 инжектора (струйный насос на базе трубки Вентури) с выходным отверстием, в котором установлен разделитель потока дыхательной жидкости в виде конической вставки 37 со спиральными канавками 36 на ее прилегающей к диффузору конической поверхности.

Соосно диффузору расположена смесительная камера 26 инжектора в виде усеченного конуса, полость которой обращена меньшим диаметром к входному отверстию полости диффузора, а большим диаметром к всасывающей полости 35 корпуса инжектора 27, в которой соосно полости смесительной камеры расположено питающее сопло 34 инжектора.

Диффузор и смесительная камера образуют трубку Вентури.

По периферии диска выполнены на одинаковом расстоянии от центра и с одинаковым окружным шагом сквозные отверстия 38 со вставками 39 из пористого материала (например, спеченного полимера или керамики).

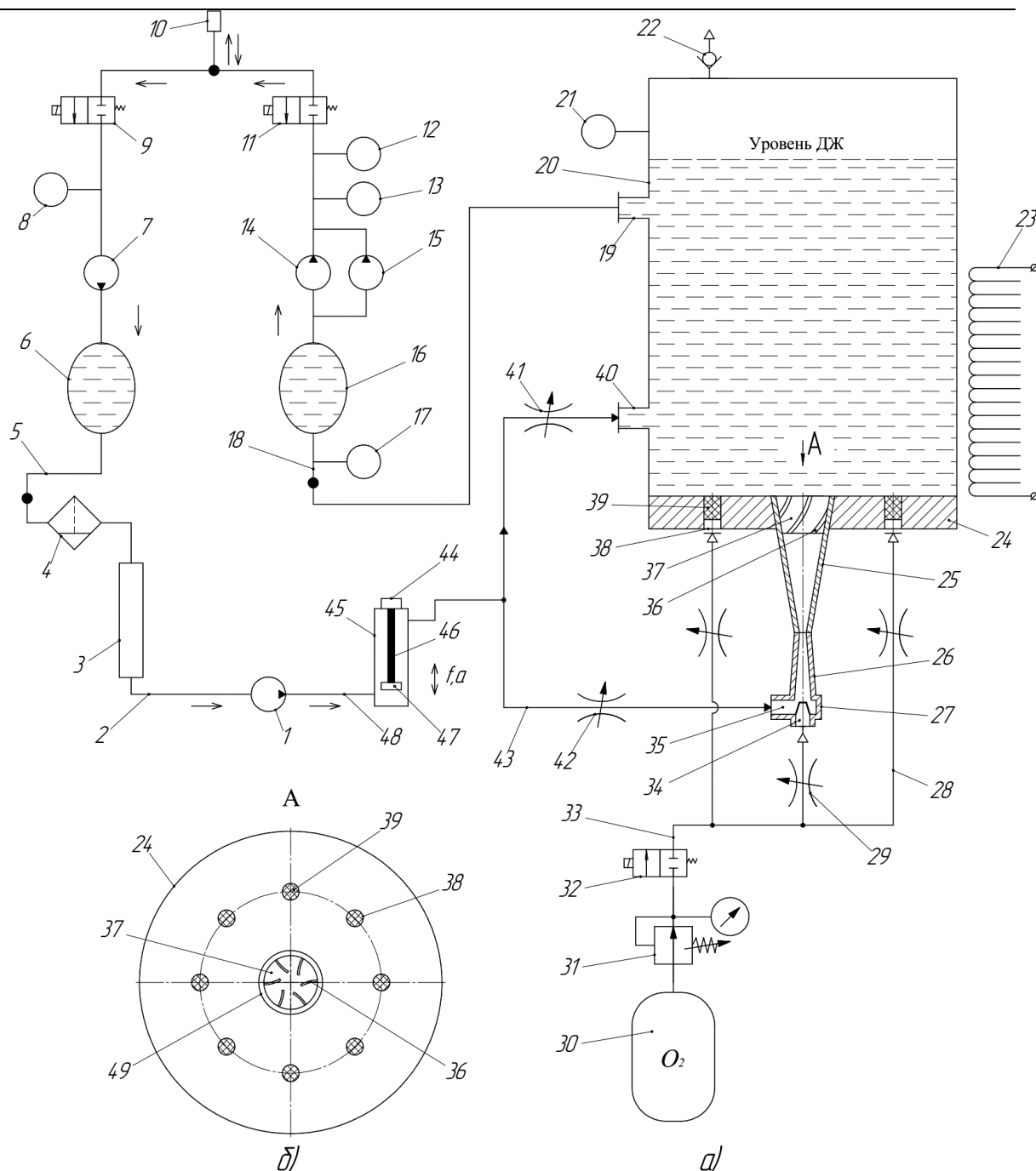


**Рис.1 – Принципиальная схема аппарата (а) и конструкция
дозатора кислорода (б)**

Питающее сопло инжектора и отверстия на периферии диска соединены посредством трубопроводов 28 со встроенными в них регулируемыми дросселями 29 и трубопровода 33 со встроенными в него отсечным электромагнитным клапаном 32 и регулятором давления 31 с баллоном сжатого кислорода 30, а всасывающая полость инжектора соединена трубопроводом 43 со встроенным в него регулируемым

дросселем 42 с трубопроводом для подвода дыхательной жидкости в полость камеры оксигенатора.

Работа аппарата осуществляется следующим образом.

Перед ее началом все полости контуров заполняются подготовленной дыхательной жидкостью, например, перфторуглеродом, а в переходник 10 (**Рис.1,а**) устанавливается эндотрахеальная трубка.

С помощью регулятора давления 31 устанавливается давление кислорода, подаваемого в дозатор оксигенатора, превышающее давление дыхательной жидкости в дыхательной системе аппарата.

Цикл работы аппарата состоит из двух фаз – фазы вдоха, продолжительностью 2...3 секунды, и фазы выдоха, продолжительностью 4...6 секунд. Необходимое время длительности каждой из фаз устанавливается с помощью пульта блока управления (на схеме не показан). Затем в трахею пациента вводится эндотрахеальная трубка.

Фаза вдоха реализуется при закрытом отсечном клапане 9 и выключенном насосе 7 контура выдоха, открытом отсечном клапане 11 контура вдоха и открытом отсечном клапане 32 в составе дозатора кислорода. Включается основной закачивающий насос 14 и дыхательная жидкость, находящаяся в полости накопительной эластичной емкости 16, поступает по трубопроводу 18 контура вдоха к эндотрахеальной трубке. Поскольку продолжительность фазы вдоха в два раза меньше продолжительности фазы выдоха, а производительность насосов 7, 14 и 15 одинаковая, использование в контуре вдоха двух закачивающих насосов 14 и 15 обеспечивает равенство объемов жидкости, перекачиваемой через контуры.

Фаза выдоха реализуется при закрытом отсечном клапане 11, выключенных насосах 14 и 15, открытом отсечном клапане 9 и включенном откачивающем насосе 7, обеспечивающих поступление выдыхаемой жидкости в накопительную емкость 6.

Одновременно с насосом 7 включается перекачивающий насос 1 контура подготовки дыхательной жидкости, который осуществляет перекачку поступающей в емкость 6 выдыхаемой жидкости в емкость 16 контура вдоха через очистной фильтр 4, обеззараживающую камеру 3, камеру 45 ультразвуковой проточной обработки жидкости и камеру 20 оксигенатора.

При реализации фаз вдоха и выдоха перекачивающий насос 1 включен постоянно.

Входящий в состав проточной камеры 45 источник ультразвукового воздействия 44, создает с помощью генератора ультразвуковые электрические колебания, которые преобразуются в механические ультразвуковые колебания с помощью преобразователя, усиливаются с

помощью ступенчатого концентратора 46 продольных колебаний и вызывают колебания с частотой f и амплитудой a рабочего инструмента в виде диска 47, закрепленного на конце концентратора.

Ультразвуковые колебания диска 47 вызывают кавитацию соприкасающейся с ним жидкости, которая приводит к образованию пузырьков из растворенных в ней газов азота, углекислого газа и кислорода. Эти пузырьки выносятся потоком жидкости из полости проточной камеры 45 в полость камеры 20 оксигенатора, где подхватываются пузырьками кислорода, поступающего из периферийных отверстий дозатора 38 со вставками 39 из пористого материала, а также из спиральных канавок 36 вставки 37, и выносятся в часть полости камеры 20, расположенную выше уровня находящейся в ней жидкости, который всегда выше отверстия отводящего патрубка 19.

При этом часть пузырьков кислорода растворяется в дыхательной жидкости, осуществляя ее насыщение кислородом, т.е. оксигенацию.

Повышению надежности насыщения способствует перемешивание дыхательной жидкости с поступающим в нее из дозатора кислородом, осуществляемое с помощью входящего в состав дозатора инжектора.

Струя сжатого кислорода, пройдя через сужение в питающем сопле 34 и всасывающую полость 35 в корпусе 27 инжектора, поступает в смесительную камеру 26. При этом, за счет кинетической энергии струи, в полости 35 создается разрежение, вызывающее подсос дыхательной жидкости из трубопровода 43 в указанную полость, откуда она вместе со струей сжатого кислорода поступает в смесительную камеру 26. Далее, образовавшийся поток дыхательной жидкости, пройдя сужение в месте соединения смесительной камеры 26 с диффузором 25, увеличивает свою скорость за счет эффекта Вентури, а проходя в полость камеры 20 оксигенатора через спиральные винтовые канавки (каналы) 36 вставки 37, разделяется на ряд более мелких потоков по числу канавок, перемещающихся в полости камеры оксигенатора по траекториям в виде расходящихся винтовых спиралей, осуществляющих перемешивание находящейся в камере дыхательной жидкости с дозируемым кислородом, способствуя тем самым повышению надежности насыщения этой жидкости кислородом.

Уровень жидкости в оксигенаторе контролируется ультразвуковым бесконтактным датчиком 21, который по каналу обратной связи через блок управления изменяет работу насоса 1, увеличивая или уменьшая расход жидкости, а накапливающаяся в верхней части полости камеры 20 оксигенатора смесь газов азота, углекислого газа и частично кислорода, при превышении давления срабатывания обратного клапана 22, удаляется через него в окружающую среду.

Обогащенная кислородом жидкость поступает в емкость 16 по трубопроводу 18 со встроенным датчиком температуры 17, который через блок управления управляет термостатом 23, поддерживая заданную температуру жидкости, проходящей через оксигенатор.

Датчик давления 12 в контуре вдоха обеспечивает через блок управления регулирование по давлению насосов 14 и 15, а датчик расхода 13 – их регулирование по расходу.

Датчик расхода 8 в контуре выдоха контролирует работу откачивающего насоса 7.

Выполнение емкостей 6 и 16 эластичными в виде упругих оболочек позволяет компенсировать возникающую при работе аппарата разность объемов жидкости, протекающей через контуры вдоха и выдоха.

С помощью регулируемых дросселей 29, 41 и 42 изменяется расход кислорода и дыхательной жидкости при настройке аппарата.

При изменении цикличности работы отсечного клапана 32, т.е. при изменении частоты его переключения, достигается порционность подачи кислорода в оксигенатор, что позволяет регулировать время насыщения кислородом протекающей через полость камеры жидкости и избежать ее перенасыщения кислородом.

Заключение.

Наличие в конструкции оксигенатора дозатора кислорода с инжектором (струйный насос на базе трубки Вентури), снабженным разделителем потока дыхательной жидкости в виде конической вставки со спиральными винтовыми канавками (каналами) для выхода дыхательной жидкости в полость камеры оксигенатора, способствует образованию в указанной полости нескольких (по числу спиральных канавок) перемещающихся с высокой скоростью (эффект Вентури) по траекториям в виде расходящихся винтовых спиралей потоков жидкости, вызывающих рост интенсивности перемешивания протекающей через полость камеры дыхательной жидкости с поступающим в нее через спиральные канавки и периферийные отверстия с пористыми вставками в диске дозатора кислородом, что повышает надежность ее насыщения кислородом до нужного уровня и уменьшает время достижения этого уровня.

Наличие встроенных в соответствующие трубопроводы для подачи кислорода к оксигенатору регулируемых дросселей, отсечного электромагнитного клапана и регулятора давления кислорода, позволяет оптимизировать данный процесс и уменьшить тем самым расход кислорода, удаляемого из полости камеры оксигенатора в атмосферу через клапан сброса в ее верхней части.

Периодическое переключение отсечного клапана обеспечивает порционность подачи кислорода в оксигенатор, что исключает возможность перенасыщения дыхательной жидкости кислородом.

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

1 Библиографический список

1. Модуль жидкостного дыхания в условиях гипербарии для модельного биообъекта: патент RU № 203446, МПК A61N 31/02/ Е.В. Пашков, В.П. Поливцев, Д.И. Манчук, В.В. Поливцев; опубликовано 06.04.2021, Бюл. №10.
2. Аппарат жидкостного дыхания: патент СССР № 764677, МПК A61N 31/02/ И.А. Бачелис, В.И. Бураковский, И.А. Люкевич, В.Ф. Иванов; опубликовано 23.09.1980, Бюл. №35.
3. Аппарат вентиляции легких жидкостью: патент RU № 2732639, МПК A61N 31/00, A61M 16/00/ Е.Ю. Бонитенко, А.А. Тоньшин, Д.В. Глухов и др.; опубликовано 21.09.2020, Бюл. №27.
4. Kaisers U, Kelly K.P., Busch T. Liquid ventilation.- British Journal of Anaesthesia, 91 (1): 143-51, 2003.
5. Аппарат жидкостного дыхания: патент RU 209285, МПК A61M 1600/В.П. Поливцев, В.В. Поливцев, Е.В. Пашков, М.И. Калинин; опубликовано 14.03.2022, Бюл. №8.

Bibliograficheskiy spisok

1. Modul' zhidkostnogo dyhaniya v usloviyah giperbarii dlya model'nogo bioob'ekta: patent RU № 203446, MPK A61N 31/02/ E.V. Pashkov, V.P. Polivcev, D.I. Manchuk, V.V. Polivcev; opublikovano 06.04.2021, Byul. №10.
2. Apparat zhidkostnogo dyhaniya: patent SSSR № 764677, MPK A61N 31/02/ I.A. Bachelis, V.I. Burakovskij, I.A. Lyukevich, V.F. Ivanov; opublikovano 23.09.1980, Byul. №35.
3. Apparat ventilyacii legkih zhidkost'yu: patent RU № 2732639, MPK A61N 31/00, A61M 16/00/ E.YU. Bonitenko, A.A. Ton'shin, D.V. Gluhov i dr.; opublikovano 21.09.2020, Byul. №27.
4. Kaisers U, Kelly K.P., Busch T. Liquid ventilation.- British Journal of Anaesthesia, 91 (1): 143-51, 2003.
5. Apparat zhidkostnogo dyhaniya: patent RU 209285, MPK A61M 1600/ V.P. Polivcev, V.V. Polivcev, E.V. Pashkov, M.I. Kalinin; opublikovano 14.03.2022, Byul. №8

¹Поливцев Виктор Петрович, к.т.н., доцент, заведующий научной лабораторией, polivcev.viktor@yandex.ru, Севастопольский государственный университет.

²Пашков Евгений Валентинович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник научной лаборатории, pashkov@sevsu.ru, Севастопольский государственный университет.

³Поливцев Владимир Викторович, руководитель научной группы лаборатории, vovapolivcev@yandex.ru, Севастопольский государственный университет.

LIQUID BREATHING APPARATUS WITH A JET OXYGENATOR OF BREATHING FLUID

V.P. Polivtsev, E.V. Pashkov, V.V. Polivtsev

The results of the analysis of the designs and functional capabilities of a number of artificial liquid respiration devices related to medical technology are presented. A schematic diagram, a description of the design and the principle of operation of the apparatus containing pipes for the circuits of inhalation, exhalation and preparation of Breathing fluid with electromagnetic valves, pumps, filter, elastic chambers, disinfection chamber, oxygenator with oxygen generator and electric thermostat, ultrasonic chamber, as well as connected to the control unit of devices for measuring the parameters of liquid circulation. An increase in the reliability of oxygen saturation of the liquid is achieved by mixing it with oxygen coming from the dispenser using an injector based on a Venturi tube included in the dispenser. The dispenser is made in the form of a disk, which is the bottom of the oxygenator, equipped with a central hole in which the end of the conical diffuser of the injector is fixed, in which a conical separator of the Breathing fluid flow with spiral grooves is installed, and holes with inserts of porous material for oxygen supply are made along the periphery of the disk. Spiral coils create fluid flows in the cavity of the oxygenator chamber moving at high speed (Venturi effect) along trajectories in the form of divergent spiral spirals, causing an increase in the intensity of mixing of the Breathing fluid, which increases the reliability of its oxygen saturation to the desired level, reduces the time to reach this level and oxygen consumption.

Keywords. Breathing fluid, oxygenator, injector, oxygen dispenser, spiral channel, helical fluid flow.

Polivtsev Viktor Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific Laboratory, Sevastopol State University.

Pashkov Evgeny Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Scientific Laboratory, Sevastopol State University.

Polivtsev Vladimir Viktorovich, head of the scientific group of the laboratory, Sevastopol State University.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 610:641

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ШТУЧНЫХ ПРЕДМЕТОВ ОБРАБОТКИ

Прейс В.В.

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования надежности резервированных роторных систем автоматической загрузки штучных предметов обработки в автоматические роторные линии. На основе теории графов разработаны аналитические модели, позволяющие на стадии проектирования дать сравнительную оценку коэффициентов готовности роторных систем автоматической загрузки, резервированных методами замещения с ненагруженным и нагруженным резервом. Показано, что применение методов резервирования замещением позволяет обеспечить повышение надежности роторных систем автоматической загрузки по сравнению с нерезервированными.

Ключевые слова. Роторная система автоматической загрузки, штучный предмет обработки, автоматическая роторная линия, методы резервирования замещением, ненагруженный резерв, нагруженный резерв, надежность, моделирование, коэффициент готовности.

Введение. Для автоматической загрузки штучных предметов обработки, представляющих собой осесимметричные тела вращения, в автоматические роторные линии (АРЛ) с производительностью от 300 до 1200 шт./мин применяют многопозиционные роторные системы автоматической загрузки (САЗ) [1,2].

С позиций надежности роторные САЗ принадлежит к сложным восстанавливаемым системам, признаками которых являются многоуровневое строение и способность функционировать с различным уровнем выходной производительности. Функциональные устройства и механизмы скомпонованы в автономные быстросъемные блочные конструкции, объединены на рабочих позициях транспортно-несущего устройства роторной САЗ и образуют многоканальную часть системы. Многоканальная часть роторных САЗ, также, как и технологических роторов АРЛ, обладает свойством повышенной «живучести»: при отказе функциональных устройств на одной рабочей позиции роторная САЗ сохраняет способность к функционированию, но с меньшей производительностью [3].

Функциональные отказы многоканальной части роторной САЗ в наибольшей степени связаны с заклиниванием предметов обработки внутри функциональных механизмов на рабочих позициях роторной САЗ и намного реже с поломкой самих механизмов. Это связано с тем, что в конструкциях приводов функциональных механизмов всегда предусматривают упругие компенсационные элементы (пружины) или предохранительные механизмы, а силовые нагрузки в структуре приводов роторной САЗ незначительны.

Следует отметить, что замена отказавших элементов роторной САЗ при остановке системы на ремонтное обслуживание может производиться наладчиком только вручную. Применение систем автоматической смены отказавшего устройства роторной САЗ практически невозможно из-за того, что внутри функциональных устройств роторной САЗ на каждой рабочей позиции проходит непрерывный поток предметов обработки.

В связи с этим обеспечение требуемого уровня надежности роторных САЗ, применяемых в АРЛ различного технологического назначения, возможно на основе создания САЗ, резервированных методами замещения с ненагруженным или нагруженным резервом [4]. Особенно это актуально для АРЛ сборки многоэлементных изделий, когда в АРЛ установлено несколько роторных САЗ (по числу собираемых элементов) [5].

Принципы построения аналитических моделей надежности роторных САЗ. Для оценки надежности роторной САЗ на этапе проектирования наиболее часто используют аналитические модели, описывающие процесс функционирования роторной САЗ посредством математических зависимостей, получаемых на основе понятий и символики теории цепей Маркова, при этом, как правило, потоки событий (отказов и восстановления работоспособности системы) представляют, как простейшие, т.е. обладающие свойствами стационарности, отсутствия последействия и ординарности [6].

В аналитических моделях функционирования роторной САЗ уровнем структуризации системы является рабочая позиция, которая рассматривается как единый элемент системы без дифференциации на отдельные функциональные устройства и механизмы. Законы распределения времени безотказной работы и восстановления, как правило, принимают экспоненциальными, полагая, что интенсивности функциональных отказов и восстановления для всех рабочих позиций роторной САЗ одинаковы. В этом случае коэффициент готовности K_r роторной САЗ при остановке системы на ремонтное обслуживание по первому функциональному отказу определяют известным выражением

$$K_r = \frac{1}{1 + \omega T_{\text{бу}}}, \quad (1)$$

где ω – среднее число отказов в единицу времени одной рабочей позиции роторной САЗ, ч^{-1} ; T_v – время восстановления одной рабочей позиции, ч; u – число рабочих позиций роторной САЗ.

Модель надежности системы роторных САЗ с ненагруженным резервом. Рассмотрим принцип работы резервированной системы, состоящей из двух роторных САЗ, одна из которых – дублирующая, находится в ненагруженном резерве (Рис.1).

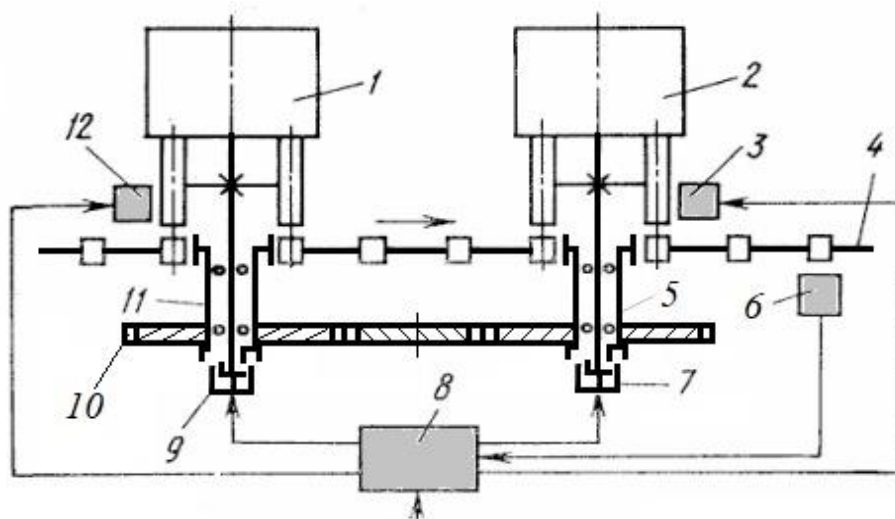


Рис.1 – Схема резервированной системы роторных САЗ с дублирующей САЗ, находящейся в ненагруженном резерве

Роторные САЗ 1, 2, огибаются транспортным цепным конвейером 4 по цепным звездочкам 5, 11, установленным на валах транспортно-несущих устройств роторных САЗ с возможностью независимого вращения относительно них. Цепные звездочки через систему зубчатых колес 10 связаны с главным приводом транспортного вращательного движения роторов АРЛ. Роторные САЗ снабжены управляемыми электромагнитными зубчатыми муфтами включения 7, 9, которые производят подключение и отключение валов транспортно-несущих устройств роторных САЗ к их цепным звездочкам. Включение и отключение электромагнитных зубчатых муфт осуществляется системой управления 8 по команде датчика 6, установленного на выходе системы и контролирующего наличие предметов обработки в гнездах цепного конвейера. При отсутствии предмета обработки в гнезде цепного конвейера система управления производит отключение электромагнитной муфты неработоспособной роторной САЗ и подключение к конвейеру дублирующей роторной САЗ, находившейся в ненагруженном резерве, автоматически прекращая поступление предметов обработки из

отключенной роторной САЗ в гнезда цепного конвейера посредством механизмов управления 3, 12 выдачей предметов обработки.

После переключения наладчик может приступить к восстановлению работоспособности отказавшего функционального устройства роторной САЗ с соблюдением мер безопасности, не останавливая АРЛ. По окончании восстановления наладчик с пульта управления подает сигнал в систему управления о готовности дублирующей (резервной) роторной САЗ.

Рассмотрим функционирование резервированной роторной САЗ в установившемся режиме при стратегии её обслуживания по первому функциональному отказу, приняв в качестве уровня структуризации системы рабочую позицию (без дифференциации на функциональные устройства). Примем, что электромагнитные муфты включения роторных САЗ имеют абсолютную надежность, а время их включения и отключения стремится к бесконечно малой величине, т.е. в момент переключения роторных САЗ отказов в их рабочих позициях не возникает.

Тогда модель функционирования резервированной системы с дублирующей САЗ, находящейся в ненагруженном резерве, может быть представлена в виде замкнутого графа, включающего следующие состояния (**Рис.2**): S_0 – основная и дублирующая (резервная) роторные САЗ полностью работоспособны, при этом основная система работает, а резервная в работу не включается; S_1 – в работающей САЗ происходит функциональный отказ и в работу включается дублирующая система, которая могла находиться на ремонтном обслуживании; S_2 – в работающей САЗ произошел функциональный отказ, а восстановление отказа в дублирующей САЗ еще не закончено, т.е. обе роторные САЗ находятся на ремонтном обслуживании.

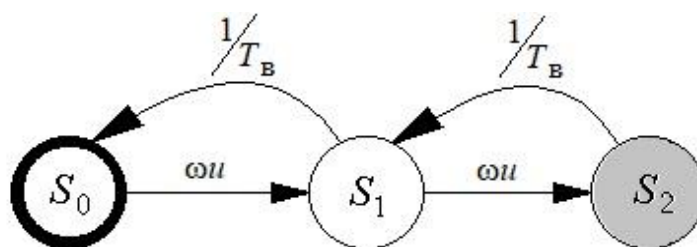


Рис.2 – Граф состояний резервированной системы роторных САЗ с дублирующей САЗ, находящейся в ненагруженном резерве

Интенсивности переходов системы из одного состояния в другое показаны на ветвях графа.

Составляя матрицу переходов роторной САЗ из одного состояния в другое и решая её для установившегося режима, когда $\frac{dP_i}{dt} = 0$, с учетом уравнения нормировки $\sum_{i=0}^2 P_i = 1$, получим выражения для предельных вероятностей P_i нахождения роторной САЗ в состояниях S_i ($i = 0, \dots, 2$)

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{1 + \omega T_B u (1 + \omega T_B u)}; \\ P_1 &= \omega T_B u P_0; \\ P_2 &= \omega T_B u P_1 = (\omega T_B)^2 u^2 P. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Коэффициент готовности роторной САЗ, резервированной методом замещения с ненагруженным резервом, равен сумме вероятностей P_0 , P_1 нахождения системы в состояниях S_0 , S_1 :

$$K_G^p = P_0 + P_1 = \frac{1 + \omega T_B u}{1 + \omega T_B u (1 + \omega T_B u)}. \quad (3)$$

Сравнительный анализ выражений для коэффициентов готовности резервированной (3) и нерезервированной (1) роторных САЗ в диапазоне значений параметров надежности их рабочих позиций $0,005 \leq \omega T_B \leq 0,05$ показывает возможность повышения коэффициента готовности резервированной системы роторных САЗ с ненагруженным резервом на 15-20 % по сравнению с нерезервированной САЗ.

Модель надежности роторной САЗ с нагруженным резервом. Метод резервирования систем замещением с нагруженным резервом в роторных САЗ можно реализовать путем введения в их структуру двойной избыточности по производительности и «пересечением» маршрутов движения потока предметов обработки из рабочих позиций роторной САЗ в гнезда транспортного конвейера АРЛ. В резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом число рабочих позиций в два раза превышает число позиций, определяемое требуемой производительностью АРЛ.

Рассмотрим принцип работы резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом на примере роторной САЗ с числом рабочих позиций $u = 4 \times 2 = 8$ (Рис.3). Транспортный цепной конвейер 1 с гнездами для приема предметов обработки огибает роторную САЗ 2 дважды: сначала на основном участке I, а затем – на резервном II, при этом после выхода с основного участка транспортный цепной конвейер смещается на один шаг за счет промежуточной цепной звездочки 3. На основном участке

I четные гнезда (2,...8) транспортного цепного конвейера сопрягаются с четными (№ 2,...№ 8) рабочими позициями роторной САЗ, а нечетные – с нечетными. После прохождения звездочки 3 транспортный цепной конвейер смещается на один шаг и уже на резервном участке **II** его четные гнезда совмещаются с нечетными рабочими позициями роторной САЗ, а нечетные гнезда – с четными рабочими позициями. Таким образом, маршруты движения потока предметов обработки из четных и нечетных рабочих позиций резервированной роторной САЗ «пересекаются».

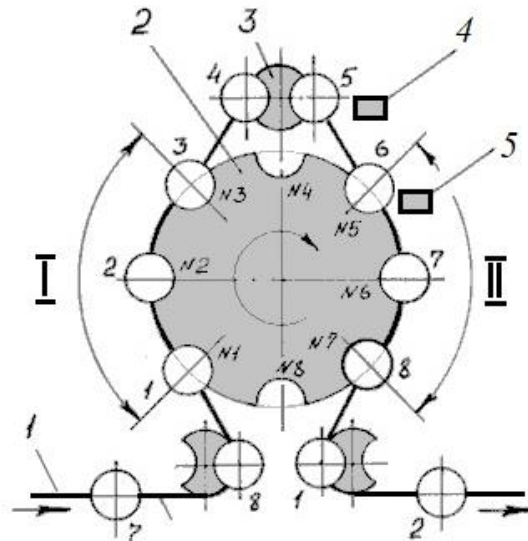


Рис.3 – Схема резервированной роторной САЗ с «пересечением» маршрутов предметов обработки ($u = 4 \times 2$)

На выходе транспортного цепного конвейера с промежуточной цепной звездочки установлен датчик 4, который контролирует наличие предметов обработки в гнездах транспортного цепного конвейера и в случае их отсутствия подает сигнал для срабатывания механизма управления 5 процессом выдачи предметов обработки с рабочих позиций роторной САЗ на резервном участке. Таким образом, при отказе какой-либо рабочей позиции роторной САЗ на основном участке гнездо транспортного конвейера может быть загружено на резервном участке из другой рабочей позиции роторной САЗ.

Функциональный отказ, связанный с отсутствием предмета обработки в гнезде транспортного цепного конвейера на выходе резервированной роторной САЗ, происходит только тогда, когда отказывают рабочие позиции роторной САЗ, входящие в соседние «пересекающиеся» маршруты. Для рассматриваемой схемы (**Рис.3**) функциональный отказ произойдет при отказе рабочих позиций САЗ № 2 и № 3 или № 3 и № 4 и т.п. При отказе позиций № 1 и № 3 на выходе роторной САЗ функционального отказа не произойдет, поскольку соответствующие

гнезда транспортного цепного конвейера будут загружены на резервном участке роторной САЗ из рабочих позиций № 8 и № 2 соответственно.

Практика эксплуатации сборочных АРЛ показала, что эффективное совмещение восстановлений практически возможно до числа отказавших рабочих позиций $k \leq 3$. Поэтому в реальных условиях эксплуатации для резервированных роторных САЗ с нагруженным резервом эффективной будет комбинированная стратегия обслуживания, заключающаяся в том, что роторную САЗ останавливают на ремонтное обслуживание, если суммарное число отказавших рабочих позиций роторной САЗ превысило установленное предельное значение $k \leq 3$ или на выходе системы в гнезде транспортного цепного конвейера отсутствует предмет обработки, т.е. произошел функциональный отказ резервированной роторной САЗ.

Разработка общей математической модели, описывающей процесс функционирования резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом при произвольном числе рабочих позиций и стратегией обслуживания по первому функциональному отказу на выходе системы, наталкивается на большие трудности, поскольку с увеличением числа рабочих позиций САЗ граф ее состояний настолько усложняется, что уже для $u > 12$ (6×2) его построение и аналитическое описание становится практически невозможным. Кроме того, из анализа состояний резервированной роторной САЗ следует, что при стратегии обслуживания только по первому функциональному отказу на выходе системы, число отказавших рабочих позиций роторной САЗ, требующих восстановления, может достигать величины $k = 0,5u + 1$. Например, для системы с $u = 12$ (6×2) $k = 7$, а для системы с $u = 24$ (12×2) $k = 13$.

Учитывая это, автором была предложена эквивалентная модель системы, описывающая процесс функционирования резервированной роторной САЗ с нагруженным резервом (по схеме «пересечения» маршрутов предметов обработки) для любого числа рабочих позиций при комбинированной стратегии ее обслуживания (**Рис.4**).

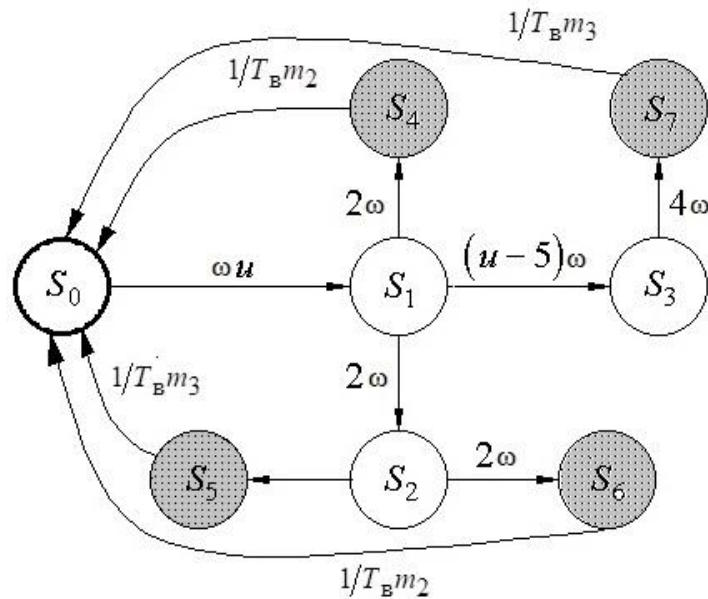


Рис.4 – Граф состояний резервированной САЗ с нагруженным резервом (эквивалентная модель системы)

Граф включает следующие состояния: S_0 – все позиции роторной САЗ работоспособны; S_1 – происходит отказ в одной из рабочих позиций, при этом функционального отказа на выходе роторной САЗ (связанного с отсутствием предмета обработки в гнезде транспортного цепного конвейера) нет; S_2, S_3 – происходит отказ в любой из рабочих позиций, не входящих в «пересекающиеся» маршруты, при этом на выходе САЗ функционального отказа нет; $S_4, \dots, S_7$ – происходит отказ в одной из рабочих позиций, входящих в «пересекающиеся» маршруты, что приводит к появлению функционального отказа на выходе роторной САЗ, или суммарное число отказавших рабочих позиций, входящих в «непересекающиеся» маршруты, достигло двух или трех.

Составляя матрицу переходов системы из одного состояния в другое и решая ее для установившегося режима, когда $\frac{dP_i}{dt} = 0$, получим систему линейных уравнений, связывающих предельные вероятности P_i нахождения роторной САЗ в состояниях S_i ($i = 0, \dots, 7$)

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = -\omega u P_0 + (1/T_B)(P_4/m_2 + P_5/m_3 + P_6/m_2 + P_7/m_3); \\ 0 = \omega u P_0 - (u-1)\omega P_1; \\ 0 = 2\omega P_1 - 3\omega P_2; \\ 0 = (u-5)\omega P_1 - 4\omega P_3; \\ 0 = 2\omega P_1 - (1/T_B)P_4/m_2; \\ 0 = \omega P_2 - (1/T_B)P_5/m_3; \\ 0 = 2\omega P_2 - (1/T_B)P_6/m_2; \\ 0 = 4\omega P_3 - (1/T_B)P_7/m_3. \end{array} \right. \quad (4)$$

Решениями системы уравнений (4) с учетом уравнения нормировки $\sum_{i=0}^7 P_i = 1$ будут величины предельных вероятностей P_i нахождения системы в состояниях S_i ($i = 0, \dots, 7$).

Коэффициент готовности роторной САЗ с нагруженным резервом и комбинированной стратегией обслуживания будет равен сумме предельных вероятностей $P_0, \dots, P_3$ нахождения ее в состояниях $S_0, \dots, S_3$

$$K_{\Gamma}^{\text{нр}} = \frac{1}{1 + \frac{10m_2 + (3u-13)m_3}{0,25(3u+17)u-3} \omega T_B u}. \quad (5)$$

Из анализа выражения (5) следует, что с увеличением числа рабочих позиций роторной САЗ эффективность ее резервирования возрастает, при этом в случае группового (совмещенного) восстановления отказавших рабочих позиций ($m_2 = 1,4$; $m_3 = 2$) резервирование обеспечивает повышение надежности роторной САЗ уже для значений числа рабочих позиций $u > 6$, а случае индивидуального (не совмещенного) восстановления ($m_2 = 2$; $m_3 = 3$) для числа позиций $u > 8$.

В случае группового восстановления не более трех отказавших рабочих позиций можно обеспечить повышение коэффициента сохранения производительности роторной САЗ до 15 % для малонадежных функциональных устройств ($\omega T_B < 0,005$) и до 5 % для высоконадежных функциональных устройств ($\omega T_B \geq 0,001$) в зависимости от степени совмещения восстановлений, при этом эффективность резервирования методом замещения с нагруженным резервом всегда тем выше, чем выше степень совмещения восстановления отказавших рабочих позиций роторной САЗ.

Заключение. Сравнительный анализ рассмотренных методов резервирования замещением показывает, что метод резервирования с нагруженным резервом обеспечивает меньшее повышение надежности роторной САЗ, однако его конструктивная реализация более проста по сравнению с методом резервирования с ненагруженным резервом.

Несмотря на незначительное относительное повышение коэффициента сохранения производительности при высоконадежных функциональных устройствах роторной САЗ, метод резервирования с нагруженным резервом обеспечивает существенное повышение фактической производительности высокопроизводительных АРЛ для сборки многоэлементных изделий, когда в одной линии установлено несколько роторных САЗ для подачи на сборку различных комплектующих предметов обработки.

Таким образом, применение резервированных роторных САЗ, реализующих методы резервирования замещением с ненагруженным или нагруженным резервом, и обоснованный выбор рациональных стратегий их обслуживания уже на этапе проектирования, позволяет обеспечить требуемый уровень надежности и производительности создаваемых АРЛ.

Библиографический список

1. Прейс В.В. Роторные системы автоматической загрузки штучных предметов обработки / В.В. Прейс // Автоматизация и современные технологии. – № 9. – 2002. – С. 3-8.
2. Прейс В.В. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в роторные и роторно-конвейерные линии / В.В. Прейс // Вестник машиностроения. – 2002. – № 12. – С. 16-19.
3. Клусов И.А. Автоматические роторные линии / И.А. Клусов [и др.]. – М.: Машиностроение. – 1987. – 288 с.
4. Прейс В.В. Резервирование систем автоматической загрузки роторных и роторно-конвейерных линий / В.В. Прейс // Кузнечно-штамп. пр-во. – 1990. – № 6. – С. 18-21.
5. Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий / В.В. Прейс // Сборка в машиностроении, приборостроении. – № 10. – 2003. – С. 17-22.
6. Прейс В.В. Надежность роторных систем автоматической загрузки. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2012. – 120 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Prejs V.V. Rotornye sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki / V.V. Prejs // Avtomatizaciya i sovremennye tekhnologii. – № 9. – 2002. – S. 3-8.

2. Prejs, V.V. Sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyh predmetov obrabotki v rotornye i rotorno-konvejernye linii / V.V. Prejs // Vestnik mashinostroeniya. – 2002. – № 12. – S. 16-19.
3. Klusov, I.A. Avtomaticheskie rotornye linii / I.A. Klusov [i dr.]. – М.: Mashinostroenie. – 1987. – 288 s.
4. Prejs, V.V. Rezervirovanie sistem avtomaticheskoy zagruzki rotornyh i rotorno-konvejernyh linii / V.V. Prejs // Kuznechno-shtamp. pr-vo. – 1990. – № 6. – С. 18-21.
5. Prejs, V.V. Nadezhnost' avtomaticheskikh rotorno-konvejernyh linii dlya sborki mnogoelementnyh izdelij / V.V. Prejs // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – № 10. – 2003. – S. 17-22.
6. Prejs V.V. Nadezhnost' rotornyh sistem avtomaticheskoy zagruzki. –Tula: Izd-vo TulGU. – 2012. – 120 s.

Прейс Владимир Викторович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, работа-preys@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SIMULATION OF RELIABILITY OF REDUNDANT ROTOR FEEDING SYSTEMS

OF PIECE PROCESSING ITEMS

V.V. Prejs

The article deals with the issues of modeling the reliability of redundant rotor automatic feeding systems of piece processing items into automatic rotor lines. On the basis of graph theory, analytical models have been developed that allow at the design stage to give a comparative assessment of the availability coefficients of rotor automatic feeding systems reserved by replacement methods with unloaded and loaded reserve. It is shown that the use of substitution redundancy methods makes it possible to increase the reliability of rotor automatic feeding systems in comparison with non-redundant systems.

Keywords: rotor automatic feeding system, piece processing item, automatic rotor line, replacement redundancy methods, unloaded reserve, loaded reserve, reliability, modeling, availability factor.

Preis Vladimir Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, работа-preys@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД КОНТРОЛЯ САМОСТОЛКНОВЕНИЙ МНОГОЗВЕННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТА SAR-401

Крамарь О.А.¹, Панасенко В.В.²

Аннотация. Статья описывает процедуру построения нейронной сети и применение нейросетевого подхода для решения задачи контроля самостолкновения многозвенных манипуляторов робототехнического комплекса SAR-401. Предлагаемый подход является альтернативой аналитическому подходу контроля самостолкновения, основанному на применении некоторых методов линейной и матричной алгебры. Показано, что предлагаемый подход является более быстрым при сохранении заданной точности.

Ключевые слова. Многозвенный манипулятор, робот, нейронная сеть.

Введение. Многозвенные манипуляторы современных робототехнических комплексов (РТК) позволяют решать высокоточные технологические задачи. Эти манипуляторы являются избыточными, обладающими степенью свободы не менее 6-DOF, что позволяет позиционировать манипулятор в любом положении в пределах своего рабочего пространства.

Желаемое движение манипулятора в рабочем пространстве происходит в результате управляющего действия в суставном пространстве, получающегося в результате кинематического управления.

Некоторые образцы робототехнических комплексов с многозвенными манипуляторами имеют копирующие костюмы, позволяющие реализовывать подход к построению управления, основанный на идеологии обучения робота выполнению различных операций по результатам действия оператора (учителя) – «Programming by Demonstration» [1]. При реализации такого подхода манипулятору РТК предоставляется информация о том, как выполнить определенную задачу. В процессе обучения происходит формирование выходного вектора x_i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, который является желаемым выходным значением, для каждого входного вектора. Задача РТК состоит в том, чтобы сформировать отображение ввода-вывода $\hat{y} = f(x)$, где $\hat{y}$ – прогнозируемый результат, который минимизирует ошибку для данного обучающего набора $E = \sum \|\hat{y} - f(x)\|$.

В качестве примера таких робототехнических комплексов можно указать робота SAR-401 [2], внешний вид которого приведен на **Рис.1**. Рассматриваемый робот произведен на ОАО «Андроидная техника».

Наличие копирующего устройства, например, копирующего костюма (**Рис.1**) дает возможность организовать копирующее управление манипуляторами, заставляя робота повторять движения оператора в реальном времени, например при работе робота в неструктурированной среде.

При реализации подхода «Programming by Demonstration» или копирующего управления манипуляторами весьма вероятно возникновение самостолкновения манипуляторов, которое может произойти либо в результате ошибочных действий оператора, либо, например, в результате несоответствия антропоморфных характеристик оператора и копирующего костюма.

В ряде статей [3,4] предлагается подход к построению кинематического управления многозвенными манипуляторами на основе нейросетевого подхода, где в качестве набора обучающих параметров выступают данные, полученные в результате решения задачи прямой кинематики. В связи с этим было бы весьма полезно организовать контроль самостолкновения манипуляторов робота используя нейросетевой подход без решения обратной задачи кинематики и применения аналитических подходов. Это, по мнению авторов, должно привести к уменьшению времени на решение задачи анализа самостолкновения, что позволит более эффективно организовать онлайн управление при реализации указанных выше подходов.



Рис.1 – Робот SAR-401

Кинематический анализ. Как указывалось выше, построение обучающего набора данных можно получить с помощью работы оператора в копирующем костюме, получая по заданным координатам x, y, z и углах Эйлера φ, θ, γ энд-эффектора его обобщенные координаты q_i . Координаты определяются в Декартовой системе координат относительно базы робототехнического комплекса. Также, зная точно параметры рассматриваемого робототехнического комплекса, в качестве набора

обучающих параметров можем принять данные, полученные в результате решения задачи прямой кинематики.

Для построения кинематической схемы антропоморфных манипуляторов робота SAR – 401 используем обозначения и методологию Денавита-Хартенберга [5]. Рассмотрим левый манипулятор.

Для представления геометрии манипулятора будем использовать кинематическая схема разработанную в [6], которая последовательно отображает представление звеньев манипулятора, соединенных между собой сочленениями. Поскольку такой манипулятор обладает только вращательным типом сочленений, то относительное расположение соседних звеньев будет определяться угловой переменной θ_i .

Параметры Денавита-Хартенберга для левого манипулятора робота SAR – 401 приведены в таблице 1.

Таблица 1. - Параметры ДН для левого манипулятора робота SAR-401

Звено, i	A_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	0	θ_i
2	0	$\pi/2$	0	$\theta_i - 90$
3	0	$\pi/2$	-0.3	$\theta_i - 90$
4	0	$\pi/2$	0	$\theta_i + 180$
5	0	$\pi/2$	-0.3	$\theta_i + 180$
6	-0.24	0	0	$\theta_i + 90$

В таблице 1 приняты обозначения: A_i – кратчайшее расстояние смежных звеньев между осями Z_{i-1} и Z_i измеряемое вдоль их общей нормали; α_i – угол между осями сочленений, измеряемый в плоскости, перпендикулярной их общей нормали, d_i – расстояния между смежными звеньями, отсчитываемые вдоль оси сочленения предыдущего звена, θ_i как и ранее обобщенные координаты – углы поворотов звеньев. Параметры θ_i , $i = \overline{1, 6}$ являются переменными и изначально равны 0.

Таким образом, создана кинематическая модель левого манипулятора SAR – 401. Для правого манипулятора параметры Денавита – Хартенберга идентичны.

Ограничения на движения сервоприводов сочленений манипуляторов робота SAR-401 – лимиты приведены в таблице 2.

При решении прямой задачи кинематики рассматриваются две системы координат: исходная, связанная с первым сочленением, X_0, Y_0, Z_0 и итоговая, связанная с энд-эффектором манипулятора X_n, Y_n, Z_n .

Таблица 2. – Лимиты сервоприводов манипуляторов

№	Min	Max	Min	max
0	-90°	0°	-90°	0°
1	0°	105°	-105°	0°
2	-40°	40°	-40°	40°
3	-110°	5°	-110°	5°
4	-40°	40°	-40°	40°
5	-10°	10°	-10°	10°

Расширенные векторы положения $X_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T$ и $X_n = [x_n \ y_n \ z_n \ 1]^T$, для указанных систем координат связаны между собой соотношением

$$X_0 = T_n^0 X_n, \quad (1)$$

где $T_n^0 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & t \end{bmatrix}$ – матрица 4x4 однородного преобразования, несущая

информацию о линейном смещении (вектор $p_{3 \times 1} = (x \ y \ z)^T$) и пространственной ориентации одной системы координат относительно другой (матрица $R_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix}$), $f_{1 \times 3} = [0 \ 0 \ 0]$ – вектор размерностью

1x3, который задает преобразование перспективы, $t = 1$ – глобальный масштабирующий множитель.

Теперь для каждого сочленения можем определить однородную матрицу преобразования T_i , задающую последовательность преобразований согласно нотации Денавита-Хартенберга: поворот вокруг оси X на угол α_i , сдвиг вдоль оси X на A_i , поворот вдоль оси Z на угол θ_i , сдвиг вдоль оси Z на d_i

$$T_i = T_{z d_i} T_{z \theta_i} T_{x A_i} T_{x \alpha_i} = \begin{bmatrix} I & p_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z \theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & p_{A_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x \alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Расчет значений матрицы преобразований, зависящей от углов $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$, осуществляется при помощи соотношения

$$T_n^0 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6. \quad (3)$$

В результате получаем матрицу преобразования

$$T_n^0 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & x \\ n_y & o_y & a_y & y \\ n_z & o_z & a_z & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Поскольку для формирования выходной выборки для обучения нейронной сети нам необходимо знать координаты каждого узла, то необходимо составить 6 матриц преобразования для каждого звена манипулятора, с помощью которых будут формироваться входные данные для обучения нейронной сети:

$$\begin{aligned} T_1^0 &= T_1, \quad T_2^0 = T_1 T_2, \quad T_3^0 = T_1 T_2 T_3, \quad T_4^0 = T_1 T_2 T_3 T_4, \\ T_5^0 &= T_1 T_2 T_3 T_4 T_5, \quad T_n^0 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6. \end{aligned} \quad (5)$$

Разработка нейронной сети. Решение задачи анализа самостолкновений манипуляторов робота SAR-401 с помощью нейросетевого подхода.

Для определений выходных данных определяются все расстояния между звеньями двух манипуляторов и в качестве выходного значения использовано минимальное расстояние между манипуляторами для каждого положения в рабочем пространстве робота в соответствии с входными данными.

Для сбора обучающих данных необходимо изменить положение двух манипуляторов рассматриваемого робототехнического комплекса в случайном порядке. Сбор данных с помощью копирующего костюма заключается в случайном расположении манипуляторов оператором и получении с робототехнического комплекса для каждого положения манипуляторов координат в пространстве всех узлов манипуляторов, а также координат x, y, z и углов Эйлера φ, θ, γ энд-эффектора. Аналогично, сбор обучающих данных с помощью решения прямой задачи кинематики заключается в случайном выборе построенных заранее положений манипулятора и нахождения с помощью решения прямой задачи кинематики, координат в пространстве всех узлов манипуляторов, а также координат x, y, z и углов Эйлера φ, θ, γ энд-эффектора. Положение манипуляторов меняется до тех пор, пока не наберется достаточное количество данных необходимых для обучения нейронной сети. Для того чтобы получить обучающие данные для нейронной сети составим конфигурационное пространство манипуляторов робота.

Данные – случайные значения возможных положений сервоприводов робота в разных местах его рабочей зоны будем собирать для двух манипуляторов и сохранять их в векторах $X_1 = [q_1^1, q_2^1, q_3^1, q_4^1, q_5^1, q_6^1]$,

$X_2 = [q_1^2, q_2^2, q_3^2, q_4^2, q_5^2, q_6^2]$, где q_i^j – это угол поворота сервопривода i -го сочленения, j -го манипулятора, X_1, X_2 – вектор положений сервопривода левого и правого манипулятора соответственно. Т.о. в качестве входных данных будем использовать значения углов поворота сервоприводов для каждого сочленения двух манипуляторов – вектор $X_{12} = [X_1, X_2]$. Далее будем называть нейронную сеть с указанным входным набором данных – Сеть 1.

Создадим второй набор входных данных (Сеть 2), в котором на вход нейронной сети будем подавать элементы матрицы преобразования – девять элементов матрицы вращения и трех значений вектора положения для каждого манипулятора (1).

В результате, на вход нейронной сети подадим вектор x_i , состоящий из 24 элементов двух матриц левого и правого манипулятора:

$$X_i = [Ln_x, Ln_y, Ln_z, Lo_x, Lo_y, Lo_z, La_x, La_y, La_z, Lx, Ly, Lz, \dots$$

$$Rn_x, Rn_y, Rn_z, Ro_x, Ro_y, Ro_z, Ra_x, Ra_y, Ra_z, Rx, Ry, Rz].$$

Здесь $TL_n^0 = \begin{pmatrix} Ln_x & Lo_x & La_x & Lx \\ Ln_y & Lo_y & La_y & Ly \\ Ln_z & Lo_z & La_z & Lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матрица преобразования для левого

манипулятора, $TR_n^0 = \begin{pmatrix} Rn_x & Ro_x & Ra_x & Rx \\ Rn_y & Ro_y & Ra_y & Ry \\ Rn_z & Ro_z & Ra_z & Rz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матрица преобразования

для правого манипулятора.

Поскольку подавляющее большинство положений двух рук не находятся в состоянии самостолкновения, для определения обучающего набора данных составим 2000 случайных положений для каждого манипулятора. В результате, для сочетания “каждый манипулятор с каждым” получаем 4000000 случайных положений. В выборке оставлены те случаи, когда один или оба манипулятора попадают по оси X в заданный коридор ± 0.07 м относительно центральной оси робототехнического комплекса, либо проходят через него (**Рис.2**). Коридор определяется толщиной манипуляторов. На **Рис.3** приведена ситуация, когда данные исключаются.

В результате, в выборке остаются три состояния:

- левый манипулятор подходит к центральной оси робототехнического комплекса по оси X, а правый манипулятор расположен произвольно;
- правый манипулятор подходит к центральной оси робототехнического комплекса по оси X, а левый манипулятор расположен произвольно.
- левый и правый манипулятор подходят к центральной оси робототехнического комплекса по оси X.

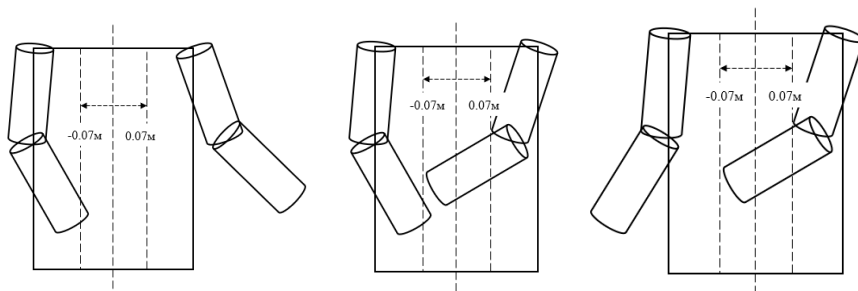


Рис.2 – Варианты расположения манипуляторов для формирования выборки входных данных

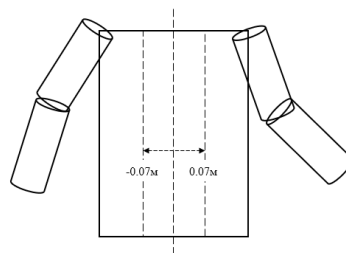


Рис.3 – Варианты расположения манипуляторов для исключения из выборки входных данных

Итого, из 4000000 данных, осталось около 200000 значений, из которых около 2000 являются столкновениями манипуляторов.

Как обычно, согласно стандартного подхода, входные данные делятся в следующей пропорции: 70% используются в качестве обучающих данных, 15% на тренировку и 15% используются для тестирования.

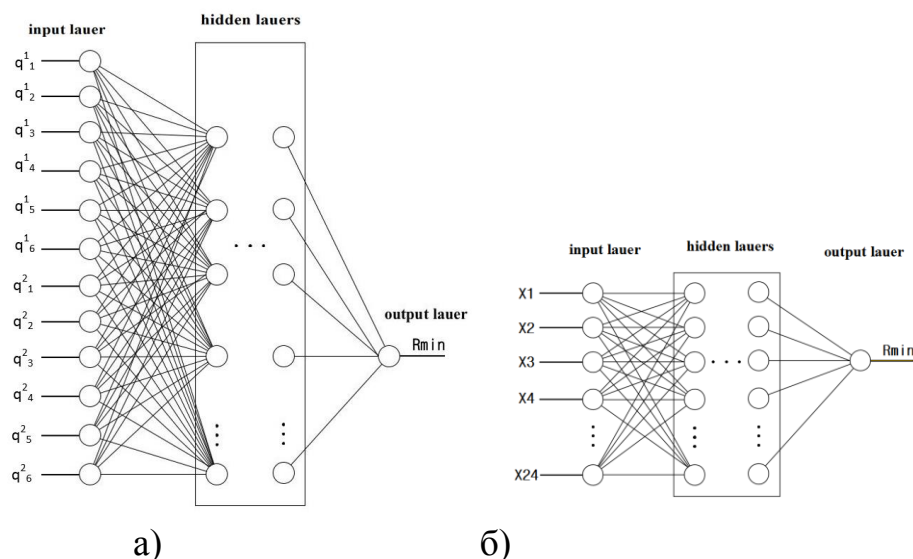
В результате проведенных экспериментов выберем в качестве функции активации сигмоидную функцию, функцию потерь будем оценивать с помощью метода Mean Squared Error и в качестве функции обучения выберем алгоритм Левенберга-Марквардта.

Подготовим две нейронные сети для проведения исследований с целью выбора наиболее точного решения. Параметры сетей приведены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры нейронных сетей для анализа самостолкновений

№	Количество данных для обучения	Количество скрытых слоев	Количество нейронов в скрытых слоях	Функция потерь (метры)
Сеть 1	250000	1	11	8.5806e-06
Сеть 2	250000	1	47	1.3562e-06

Как и ранее, будем исследовать нейронные сети простейшего вида в виде многослойного персептрона (**Рис.4**).

**Рис.4 – Архитектура нейронной сети; а) Сеть 1, б) Сеть 2**

В результате определили конфигурацию нейронной сети, с помощью которой будем проводить исследования по обучению для определения самостолкновения на основе нейросетевого подхода.

Для обучения нейронной сети с учителем использован заранее подготовленный обучающий набор данных, состоящих из 177979 вариантов положения манипуляторов в пространстве. Функция потерь для каждой из сетей приведена в таблице 3.

Обучение обеих сетей показали хорошие результаты прогнозирования минимального расстояния между манипуляторами и могут с минимальной погрешностью прогнозировать самостолкновение между руками робота.

На вход нейронной сети 1 подаем 12 значений q левого и правого манипулятора, на выходе получаем одно значение - минимальное расстояние между манипуляторами. Средняя ошибка составляет – $8.5806e-06$ метра/

На **Рис.5** приведено решение для сети 1 и для сети 2, где красным цветом показано решение сети, а синим – эталонное решение. d – минимальное расстояние между манипуляторами, t – количество обучающих данных

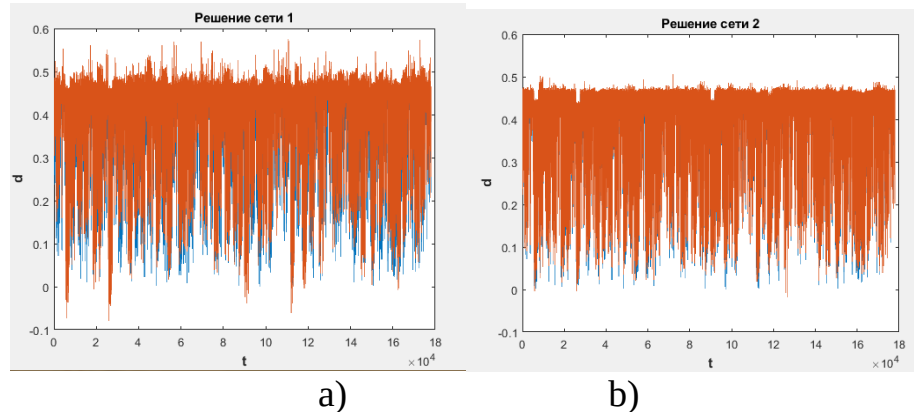


Рис.5 – а) Решения нейронной сети 1; б) решения нейронной сети 2

На вход нейронной сети 2 подаем каждое значения матриц преобразований, 24 значения, на выходе сети получаем одно значение – минимальное расстояние между манипуляторами. Средняя ошибка составляет – $1.3562e-06$ метра.

Из графиков видно, что сеть 2 показывает более точный результат. Остановим свой выбор на сети 2, где в качестве входных данных используются элементы матрицы преобразования и матрицы поворота.

Испытания. Используя разработанную нейронную сеть, проведем испытания правильности работы разработанного алгоритма управления с контролем самостолкновения. Испытания проведены с помощью MatLab для проверки работы алгоритма управления, с помощью симулятора робота SAR-401 и самого робота для проверки режима копирующего управления. Как и ранее установим минимальное расстояние между манипуляторами в 0.14 метров

В результате работы (**Рис.6**) создана нейронная сеть работает верно, блокируя движения манипуляторов в случае обнаружения их самостолкновения.

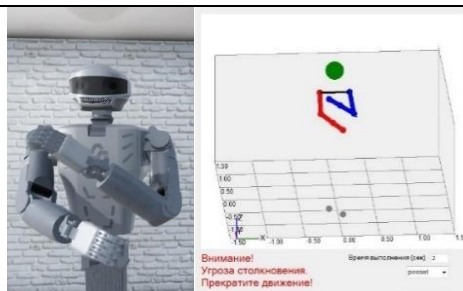


Рис.6 – Результат работы алгоритма в MatLab и в симуляторе

Заключение. В связи с активным внедрением многозвенных манипуляторов для выполнения сложных технологических операций разрабатываются различные методы для их управления [7]. При этом активно развиваются нейросетевые подходы. В рамках построения управления важной составляющей решения задачи построения управления многозвенными манипуляторами при их совместной работе является контроль их возможного самостолкновения при выполнении технологических операций. Особенно важной эта задача становится при реализации копирующего управления или подхода «Programming by Demonstration».

В статье предложен вариант анализа самостолкновения многозвенных манипуляторов при их согласованной работе. Предложенный подход, в отличие от основанных на аналитическом решении поставленной задачи, основан на применении нейросетевого подхода.

В итоге мы получим весьма эффективное решение с точки зрения скорости работы алгоритма и точности по сравнению с методами, основанными на аналитическом решении.

При этом, полученное решение может быть комплексным, используя нейросетевой подход и для решения обратной задачи кинематики и выполняя контроль самостолкновения многозвенных манипуляторов. В настоящей работе данная задача решена на основе регрессионного подхода, хотя в дальнейшем авторам видится решение задачи на основе классификационных подходов для получения однозначного ответа – есть самостолкновение или нет, без дополнительной обработки выходных данных нейронной сети.

Библиографический список

1. Peters J. Robot Learning. Handbook of Robotics / J. Peters, D. Lee, J. Kober, D. Nguyen-Tuong, J.A. Bagnell, S. Schaal. – Chapter 15, 2016. – pp. 2227.
2. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // New defense order. Strategies, Sankt-Peterburg, 2019. – №5(58).
3. Youshen X. A Dual Neural Network for Kinematic Control of

-
- Redundant Robot Manipulators / X. Youshen, W. Jun // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part b: cybernetics, 2001. – vol. 31, no. 1. – p.147-154.
4. Bingul Z. Comparison of inverse kinematics solutions using neural network for 6R robot manipulator with offset / Z. Bingul, H.M. Ertunc, C. Oysu // 2005 ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, 2005. – pp. 5.
 5. Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 1955. – 23. – pp. 215-221.
 6. Kramar V. A. An Artificial Neural Network Approach for Solving Inverse Kinematics Problem for an Anthropomorphic Manipulator of Robot SAR-401 / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov // Machines, 2020. – V.10, N.4. – pp.241.
 7. Hasan T. Artificial neural networkbased kinematics Jacobian solution for serial manipulator passing through singular configurations / T. Hasan, N. Ismail, A.M. S.Hamouda, I.Aris, M. H.Marhaban, H.M.A.A. Al-Assadi // Advances in Engineering Software, 2010. – vol. 41, no. 2. – pp. 359–367.

Bibliograficheskiy spisok

1. Peters J. Robot Learning. Handbook of Robotics / J. Peters, D. Lee, J. Kober, D. Nguyen-Tuong, J.A. Bagnell, S. Schaal. – Chapter 15, 2016. – pp. 2227.
2. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // New defense order. Strategies, Sankt-Peterburg, 2019. – №5(58).
3. Youshen X. A Dual Neural Network for Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators / X. Youshen, W. Jun // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part b: cybernetics, 2001. – vol. 31, no. 1. – p.147-154.
4. Bingul Z. Comparison of inverse kinematics solutions using neural network for 6R robot manipulator with offset / Z. Bingul, H.M. Ertunc, C. Oysu // 2005 ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, 2005. – pp. 5.
5. Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 1955. – 23. – pp. 215-221.
6. Kramar V. A. An Artificial Neural Network Approach for Solving Inverse Kinematics Problem for an Anthropomorphic Manipulator of Robot SAR-401 / V. Kramar, O. Kramar, A. Kabanov // Machines, 2020. – V.10, N.4. – pp.241.
7. Hasan T. Artificial neural networkbased kinematics Jacobian solution for serial manipulator passing through singular configurations / T. Hasan,

N. Ismail, A.M. S.Hamouda, I.Aris, M. H.Marhaban, H.M.A.A. Al-Assadi // *Advances in Engineering Software*, 2010. – vol. 41, no. 2. – pp. 359–367.

¹*Крамарь Олег Александрович, rolets@yandex.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Панасенко Владимир Валерьевич, panasenkovolodia@yandex.ru, Россия, Севастополь, ЧВБМУ им. П.С. Нахимова*

THE NEURAL NETWORK APPROACH TO CONTROL OF SELF-COLLISIONS OF MULTILINK MANIPULATORS OF SAR-401 ROBOT

O.A. Kramar, V.V. Panasenko

The article describes the procedure for constructing a neural network and the application of a neural network approach to solving the problem of controlling the self-collision of multilink manipulators of the SAR-401 robot. The proposed approach is an alternative to the analytical self-collision control approach based on the application of some methods of linear and matrix algebra. It is shown that the proposed approach is faster while maintaining the given accuracy.

Keywords: multilink manipulator, robot, neural network.

Kramar Oleg Aleksandrovich, rolets@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Panasenko Vladimir Valerievich, panasenkovolodia@yandex.ru, Russia, Black Sea Navy School

УДК 621.317.382.016.25

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГЕРЦЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Серов А.Н.¹, Иваненко К.А.², Золкин Д.С.³

Аннотация. В настоящее время для средств измерения показателей качества электроэнергии требуется реализация измерений параметров реактивной мощности: реактивная мощность отдельных гармоник, реактивная мощность первой спектральной компоненты, реактивная мощность в заданной полосе частот. Для измерения всех указанных параметров эффективно применение спектрального анализа. В случае измерения небольшого числа гармоник представляется эффективным применения преобразователя Герцеля. Рассмотрены методические погрешности измерения параметров реактивной мощности, связанные с отклонением частоты входного сигнала от номинального значения. Предложен подход для снижения погрешности, основанный на подстройке обрабатываемых отсчетов под текущее значение частоты входного сигнала. Получены выражения, позволяющие оценить погрешности измерения всех трёх параметров реактивной мощности. Рассмотрены варианты реализации преобразователя Герцеля. Отдельно представлен вариант реализации, базирующийся на подстройке числа отсчетов под текущее значение частоты. Рассмотрено влияние инструментальных составляющих погрешности измерительных каналов напряжения и тока (аддитивной, мультипликативной, линейности, квантования) на погрешности измерения параметров мощности. Предложена имитационная модель измерительного преобразователя параметров мощности, выполненная в пакете Matlab/Simulink.

Ключевые слова. Реактивная мощность, дискретное преобразование Фурье, преобразователь Герцеля, девиация частоты, имитационное моделирование, погрешность измерения.

Введение. Параметры реактивной мощности являются одними из наиболее важных в электроэнергетике и нуждаются в периодическом измерении и контроле. Нормативные документы предписывают выполнение измерений данных параметров для средств измерения показателей качества электроэнергии. Среди параметров реактивной мощности выделяют реактивную мощность: основной спектральной компоненты, реактивную мощность гармоник и реактивную мощность в заданной полосе частот [1,2].

Под реактивной мощностью основной спектральной компоненты понимается величина, определяемая выражением [1,2]:

$$Q_1 = 0.5U_{m,1}I_{m,1} \sin(\varphi_1) = \operatorname{Re}(2\dot{U}_1\dot{I}_1 / N^2), \quad (1)$$

где $U_{m,1}, I_{m,1}$ – амплитудные значения основных спектральных компонент напряжения и тока соответственно; φ_1 – фазовый сдвиг между основными спектральными компонентами напряжения и тока; $\dot{U}_k$ – комплексный спектр основной спектральной компоненты напряжения; $\dot{I}_k$ – комплексно-сопряженный спектр основной спектральной компоненты тока.

Реактивная мощность гармоник определяется следующим обобщенным выражением [2]:

$$Q_k = 0.5U_{m,k}I_{m,k} \sin(\varphi_k) = \operatorname{Re}(2\dot{U}_k\dot{I}_k / N^2), \quad (2)$$

где $U_{m,k}, I_{m,k}$ – амплитудные значения рассматриваемых (k -ых) спектральных компонент напряжения и тока соответственно; φ_k – фазовый сдвиг между рассматриваемыми спектральными компонентами напряжения и тока.

Реактивная мощность в заданной полосе частот может быть оценен с помощью выражения (1), (2) [2]:

$$Q_k = \sum_{k=k1}^{k=k2} 0.5U_{m,k}I_{m,k} \sin(\varphi_k) = 2 \operatorname{Re}(\sum_{k=k1}^{k=k2} \dot{U}_k\dot{I}_k / N^2). \quad (3)$$

Среди методов измерения реактивной мощности [3–5] наибольшей эффективностью отличается метод, основанный на спектральном анализе напряжения и тока. Для определения амплитудных и фазовых значений гармоник может быть использован спектральный анализ, для выполнения которого эффективно применение дискретного преобразования Фурье [6–8]. Для снижения числа математических и логических операций, требуемых при реализации ДПФ частот, используют алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) и преобразователь Герцеля.

Основная причина возникновения погрешности измерения параметров мощности при применении ДПФ связан с отклонением частоты входного сигнала от номинального значения. как известно из [6–8], относительная погрешность измерения реактивной мощности в первом приближении пропорциональна относительному отклонению частоты. Для прецизионных измерительных приборов возникают задачи снижения данной погрешности в условиях реальных электрических сетей, где отклонение частоты может достигать единиц процента.

В случае применения алгоритмов БПФ снижение погрешности достигается путем подстройки частоты дискретизации цифровым или аналоговым образом. Оба подхода обладают рядом недостатков: требуется реализация дополнительных модулей, обеспечивающих подстройку

частоты дискретизации и возникает дополнительная погрешность измерения спектра (и как следствие реактивной мощности), вызванная неидеальностью выполнения подстройки. При измерении небольшого числа гармоник может быть применен преобразователь Герцеля, что позволяет осуществлять снижение погрешности путем подстройки числа отсчетов. Это существенно упрощает реализацию метода измерения и повышает результирующую точность.

Другой источник погрешности связан с неидеальностью элементов измерительного канала. Среди погрешностей измерительного канала выделяют аддитивную и мультипликативную погрешность, погрешность линейности и погрешность квантования. Последние две составляющие погрешности вызваны неидеальностью аналого-цифровых преобразователей (АЦП), входящих в состав измерительных каналов напряжения и тока и представляют наибольшие проблемы для учета и компенсации при измерении реактивной мощности.

Метод измерения реактивной мощности, основанный на спектральном анализе. Как видно из полученных выше соотношений (1)–(3) для измерения всех рассматриваемых параметров реактивной мощности необходимы значения амплитудного и фазового спектров напряжения и тока или значения их комплексных спектров. Значения комплексных спектров могут быть получены путем выполнения спектрального анализа; могут быть получены комплексные спектры напряжения и тока, после чего значение требуемого параметра реактивной мощности определяется соотношением (1), (2) или (3) в зависимости от измеряемого параметра.

Методическая составляющая погрешности. Как известно, основным источником погрешности при выполнении спектрального анализа является отклонение частоты сигнала от номинального значения. По причине отклонения частоты изменяется форма сигнала за время измерения и требование кратности времени измерения и периода сигнала может не выполняться без выполнения дополнительной подстройки. Это в свою очередь приводит к возникновению мнимых спектральных компонент и искажению реально существующих гармоник. В работе [6] были получены выражения для учета погрешности измерения амплитудного, фазового, комплексного спектров и параметров мощности. Для случая реактивной мощности погрешность принимает следующий вид (представлено выражение, справедливое для случаев основной спектральной компоненты и гармоник):

$$Q[k] = \frac{U_m I_m \sin^2(\pi m \delta_f)}{2N^2} \cdot \left(\frac{\sin(\varphi)}{\sin^2\left(\frac{\pi(m-k-m\delta_f)}{N}\right)} - \frac{\sin(\varphi)}{\sin^2\left(\frac{\pi(m+k-m\delta_f)}{N}\right)} \right). \quad (4)$$

Выражение (4) получено для случая синусоидальных входных напряжения и тока. Из (4) видно, что погрешность равна нулю в случае, когда время измерения выбирается строго кратным истинному значению периода входного сигнала:

$$T_A = m \cdot T_{1,real} \cong m \cdot T_{1,real}, \quad (5)$$

где $T_{1,real}$ – истинное значение периода входного сигнала; $T_{1,real}$ – измеренное значение периода входного сигнала; m – число наблюдаемых периодов за общее время измерения T_A .

В случае малых отклонений частоты от номинального значения выражение (4) преобразуется к следующему виду (отдельно представлены выражение для основной спектральной компоненты и гармоник):

$$\delta Q[k]|_{k=m} = -(\pi m \delta_f)^4 / 3, \quad (6)$$

$$Q[k]|_{k \neq m} = \frac{U_m I_m}{2N^2} \cdot ((\pi m \delta_f)^2 - \frac{(\pi m \delta_f)^4}{3}) \times \\ \times \left(\frac{\sin(\varphi)}{\sin^2\left(\frac{\pi(m-k-m\delta_f)}{N}\right)} - \frac{\sin(\varphi)}{\sin^2\left(\frac{\pi(m+k-m\delta_f)}{N}\right)} \right). \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) использованы для оценки погрешности измерения реактивной мощности для всех алгоритмов реализации ДПФ тока и напряжения, среди которых: прямая реализация ДПФ; алгоритмы быстрого преобразования Фурье; алгоритм Герцеля и др.

Для снижения методической составляющей погрешности могут быть использованы различные подходы, так или иначе связанные с обеспечением соотношения (6), среди данных подходов можно выделить:

- измерение частоты сигнала и подстройка числа обрабатываемых отсчетов N ;
- измерение частоты сигнала и подстройка частоты дискретизации f_S ;
- применение так называемых оконных функций.

Первый подход представляется наиболее простым в реализации, но не подходит для случая использования алгоритма БПФ, где число отсчетов сигнала не может принимать произвольные значение (должно быть кратным степени числа два или четырех). Данный подход подходит для прямой реализации ДПФ и для алгоритма Герцеля. Точность выполнения подстройки зависит от погрешности измерения частоты и частоты дискретизации, которая влияет на составляющую погрешности, вызванную дискретной природой параметра N . При этом погрешность измерения реактивной мощности может быть оценена полученными ранее формулами

(6) и (7), а вместо параметр δ_f следует использовать значение, учитывающее и погрешность измерения частоты и дискретный характер N :

$$\delta_{f,opt} = \delta_f + T_s/(2mT). \quad (8)$$

Применение других подходов сопряжено с рядом трудностей. Изменение частоты дискретизации при реализации в программном виде требует использования преобразователей частоты дискретизации [9]. Эти устройства приводят к появлению дополнительных погрешностей, практическая оценка которых также вызывает существенные сложности.

Применение оконных функций на практике также сопряжено с рядом сложностей, связанных с выполнением компенсации оконной функции на реальные спектральные компоненты входного сигнала. По этой причине применение этих подходов оправдано (и практически используется) только в случае БПФ.

Инструментальная составляющая погрешности. Помимо методической составляющей погрешности, существует инструментальная составляющая, вызванная несовершенством применяемой элементной базы. Инструментальная составляющая по зависимости от значения измеряемой величины может быть разделена на аддитивную, мультипликативную, погрешность линейности и погрешность квантования. При этом значение произвольного отчета напряжения и тока принимает следующий вид:

$$x[n] = x_r[n] \cdot (1 + \delta x_M) + \Delta x_A + \Delta x_L[n] + \Delta x_Q[n], \quad (9)$$

где Δx_A – аддитивная составляющая погрешности; δx_M – мультипликативная составляющая погрешности; Δx_L – погрешность линейности; Δx_Q – погрешность квантования.

Поскольку и сигнал тока и сигнал напряжения подвергаются преобразованию Фурье, то на погрешность измерения реактивной мощности влияют составляющие погрешности измерения спектра этих сигналов.

Аддитивная составляющая погрешности приводит к возникновению постоянной составляющей спектра рассматриваемого сигнала. При этом нормированное значение спектра сигнала равно значению аддитивной составляющей. Тогда значение реактивной мощности, соответствующее постоянному входному сигналу определяется выражением:

$$Q_0 = Re(2\Delta U_A \Delta I_A / N^2) = 0. \quad (10)$$

где ΔU_A – аддитивная составляющая погрешности измерения напряжения; ΔI_A – аддитивная составляющая погрешности измерения тока.

Мультипликативная составляющая погрешности линейно зависит от значения входного сигнала. С точки зрения спектра данная составляющая приводит к пропорциональным изменениям всех спектральных компонент сигнала. Тогда относительная погрешность измерения реактивной мощности отдельной спектральной компоненты принимает вид:

$$\delta Q_k = \delta U_M + \delta I_M, \quad (11)$$

где δU_M – относительная мультипликативная составляющая погрешности измерения напряжения; δI_M – относительная мультипликативная составляющая погрешности измерения тока.

Погрешность линейности и погрешность квантования каналов измерения напряжения и тока влияют на комплексные спектры данных сигналов. Это в свою очередь приводит к возникновению погрешности измерения всех рассматриваемых параметров реактивной мощности (см. выражения (1)-(3)). В публикации [10] получены погрешности измерения амплитудного и фазового спектров напряжения и тока. При этом погрешность измерения реактивной мощности отдельной гармоники определяется выражением:

$$2Q_k = \Delta U_{LQ,k} \cdot I_{m,k} \sin(\varphi_k) + \Delta I_{LQ,k} \cdot U_{m,k} \sin(\varphi_k) + \Delta U_{LQ,k} \cdot I_{m,k} \sin(\Delta\varphi_k), \quad (12)$$

где $\Delta U_{LQ,k}$ – погрешность k -ой спектральной компоненты напряжения, вызванная погрешностью линейности и квантования измерительного канала напряжения; $\Delta I_{LQ,k}$ – погрешность k -ой спектральной компоненты тока, вызванная погрешностью линейности и квантования измерительного канала тока; $\Delta\varphi_k$ – погрешность фазового сдвига между k -ми спектральными компонентами напряжения и тока.

Значения параметров $\Delta U_{LQ,k}$, $\Delta I_{LQ,k}$, $\Delta\varphi_k$ для различных подходов к аппроксимации нелинейности измерительного канала и погрешности квантования могут быть получены из публикаций [10].

Следует отметить, что рассматриваемые подходы к оценке погрешности измерения параметров реактивной мощности подходят для всех способов реализации алгоритмов ДПФ, перечисленных выше.

Реализация алгоритма Герцеля для измерения реактивной мощности. Алгоритм Герцеля, по сравнению с прямой реализацией ДПФ требует выполнения меньшего числа арифметических операций. Для реализации ДПФ согласно алгоритму Герцеля следует представить ДПФ как фильтрацию и после выполнения арифметических преобразований представить функцию передачи такого фильтра в следующем виде:

$$H_k(z) = \frac{1 - z^{-N}}{1 - e^{j\frac{2\pi k}{N}} z^{-1}}. \quad (13)$$

Таким образом, для реализации ДПФ в соответствии с алгоритмом Герцеля требуется реализация цифрового фильтра, имеющего функцию передачи согласно соотношению (13). Как говорилось ранее, для устранения методической составляющей погрешности время измерения должно быть выбрано кратным периоду входного сигнала, то есть соотношение (5) должно выполняться. В реальных электрических сетях вследствие отклонения частоты от номинального значения данное соотношение строго не выполняется, что приводит к возникновению методической погрешности.

Данная методика снижения погрешности состоит в периодическом измерении текущего значения частоты сигнала и выполнении подстройки числа обрабатываемых отсчетов таким образом, чтобы соотношение (5) выполнялось. Результирующая погрешность измерения реактивной мощности может быть рассчитана согласно соотношений (6)-(7) с учетом (8).

На **Рис.1** показана реализация алгоритма Герцеля, выполненная в пакете имитационного моделирования Matlab/Simulink. Дополнительный член Z^{-N} соотношения (13) требуется для обеспечения правильных результатов преобразования для любого отсчета входного сигнала (меньше или, наоборот, превосходящего по номеру длительность окна измерения N). Для реализации данной составляющей в схеме предусмотрен блок задержки на N отсчетов, соединяющий вход и основной сумматор.

Для реализации предложенного алгоритма снижения погрешности требуется выполнить следующие действия: измерить частоту сигнала одним из цифровых методов [9]; вычислить оптимальное число обрабатываемых отсчетов согласно соотношению (5); выполнить сброс ячеек задержки (см. Рис. 1); выполнить измерение реактивной мощности: результат доступен по достижении N_{opt} отсчетов сигнала (где N_{opt} – оптимальное число отсчетов полученное с помощью соотношения (5)).

Основной проблемой реализации рассматриваемого алгоритма измерения является динамическая погрешность. Динамическая погрешность возникает при включении устройства, подачи сигнала сброс на внутренние ячейки, изменения значения параметра N и изменения параметров входного сигнала. Изменения значения параметра N связаны с описанной выше методикой снижения эффекта «растекания спектра» и выражается в подстройке поворотного коэффициента $e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}$ и изменения числа тактов задержки блока Z^{-N} (**Рис.1**).

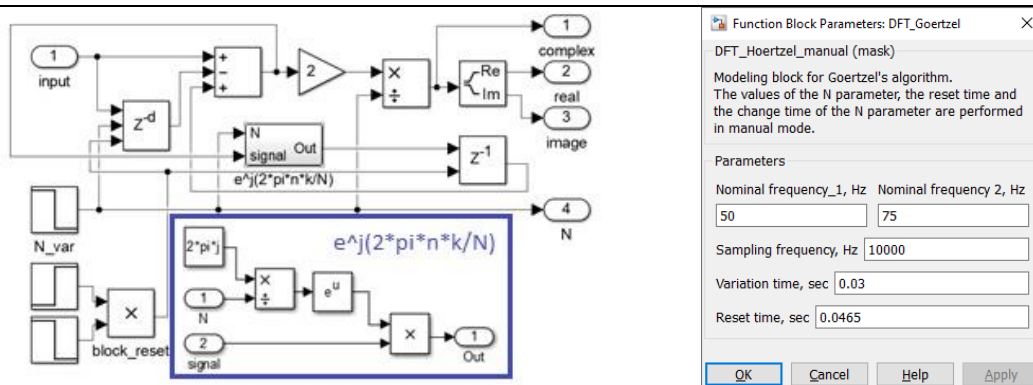


Рис.1 – Модель измерительного преобразователя спектра сигнала, выполненная в пакете Simulink

Результаты имитационного моделирования показывают, что простое изменение значения параметра N приводят к значительным погрешностям во входном сигнале, достигающим 100 % (см. Рис. 2 синюю зависимость). По этой причине для снижения погрешности требуется дополнительный сигнал сброса внутренних ячеек хранения (Z^{-1} и Z^{-N} , **Рис.1**). Это инициирует дополнительный переходной процесс, связанный со сбросом ячеек, но устраняет описанный выше эффект увеличения погрешности.

Результаты имитационного моделирования показывают, что момент изменения значения параметра практически не влияет на возникающую погрешность. С другой стороны, момент выполнения дополнительного сброса существенно влияет на возникающую динамическую погрешность. При этом длительность переходного процесса постоянна и равна как $t_{tr} = NT_s$. Значения и характер изменения динамической погрешности зависят от соотношения выходных сигналов преобразователей при начальном (**Рис.2**, красную зависимость) и конечном (**Рис.2**, зеленая зависимость) значениях N . Наименьшая погрешность возникает, если изменение параметра N происходит когда производные и знаки обоих сигналов совпадают.

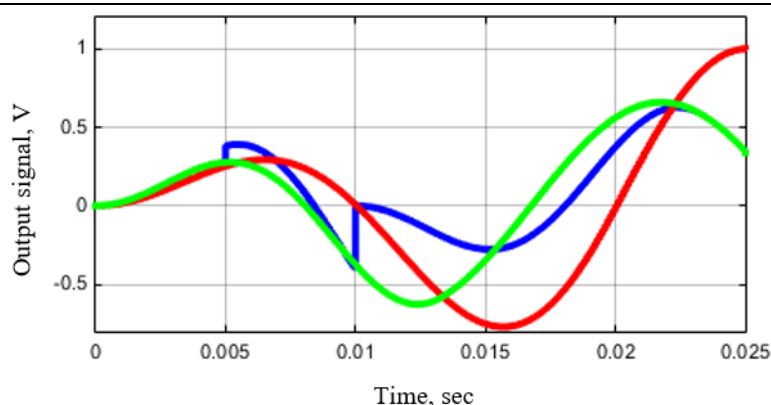


Рис.2 – Временные зависимости преобразователя Герцеля, полученные для модели Рис. 1. Рассмотрен случай изменения длины фильтра N . Зависимость, соответствующая частоте пропускания 50 Гц (красная зависимость), 75 Гц (зеленая зависимость) и зависимость с изменением частоты пропускания (синяя зависимость)

С практической точки зрения наблюдать данное соотношение затруднительно, поскольку конечная зависимость в реальном устройстве неизвестна. В случае, когда различия в значениях параметра N невелики (рассматриваемый нами случай, поскольку изменение частоты не является быстрым процессом) сброс имеет смысл выполнять для текущего выходного сигнала максимально приближенного к его переходу через нуль. Вне зависимости от формы конечного выходного сигнала это позволяет снизить скачок в момент выполнения сброса, что подтверждается результатами имитационного моделирования.

Заключение. В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- рассмотрен подход к измерению параметров реактивной мощности с помощью ДПФ напряжения и тока;
- для случая синусоидальных сигналов, получены аналитические выражения (4), (5) и (6) для оценки погрешности измерения параметров реактивной мощности от отклонения частоты входного сигнала;
- предложен алгоритм снижения погрешности измерения параметров мощности, основанный на подстройке числа обрабатываемых отсчетов;
- получены выражения для оценки погрешности измерения параметров реактивной мощности при применении предложенного алгоритма снижения погрешности;
- рассмотрено влияние аддитивной, мультипликативной, линейности и квантования составляющих погрешности измерительных каналов напряжения и тока на погрешность измерения реактивной мощности;

– в пакете Matlab/Simulink предложена имитационная модель для оценки погрешности измерения реактивной мощности гармоник на основе преобразователя Герцеля;

– показано, что динамическая погрешность измерения реактивной мощности минимальна при выполнении сброса ячеек задержки в окрестностях перехода через ноль выходного сигнала преобразователя.

Библиографический список

1. Emanuel A.E. Powers in nonsinusoidal situations – a review of definitions and physical meaning // IEEE Trans. on Power Delivery, 1990. – vol. 5, no. 3. – pp. 1377-1389.
2. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, balanced or unbalanced conditions // IEEE Std. 1459-2010.
3. Moulin E. Measuring reactive power in energy meters // Metering International, 2002. – no. 1. – pp. 52.
4. Saranovac L.V. Digital realization of frequency insensitive phase shifter for reactive var-hour meters // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000. – vol. 49, no. 4. – pp. 802-808.
5. Spasojevic B. The time domain method for power line reactive energy measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007. – vol. 56, no. 5. – pp. 2033-2042.
6. Михалин С.Н. Проблемы цифровой обработки сигналов в системе автоматизированного контроля качества и учета количества электроэнергии (АСКУЭ) / С.Н. Михалин, В.М. Геворкян // Вестник МЭИ. – 2005. – №1. – С. 86-92.
7. Serov A.N. The Influence of Power Frequency Deviation on the Active and Reactive Power Measurement Error with the Application of DFT / A.N. Serov, A. Novitskiy, A.A. Shatokhin, S. Schlegel, E.A. Dolgacheva, D. Westermann // 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), 2019. – pp. 1-6.
8. Lima M. A method of Dynamic Resampling for DFT-based harmonic analysis under time-varying frequency conditions / M. Lima, J. de Carvalho, D. Coury, A. Cerqueira, C. Duque // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010), 2010. – pp. 1-6.
9. Begovic M.M. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics / M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke // IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. – vol. 8, no. 2. – pp. 480-486.
10. Serov A.N. Influence of Voltage and Current Samples Errors on the Reactive Power Measurement Error / A.N. Serov, N.A. Serov, I.P. Konchalovsky // XXX International Scientific Symposium 'Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2020. – pp. 1–6.

Bibliograficheskiy spisok

1. Emanuel A.E. Powers in nonsinusoidal situations – a review of definitions and physical meaning // IEEE Trans. on Power Delivery, 1990. – vol. 5, no. 3. – pp. 1377-1389.
2. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, balanced or unbalanced conditions // IEEE Std. 1459-2010.
3. Moulin E. Measuring reactive power in energy meters // Metering International, 2002. – no. 1. – pp. 52.
4. Saranovac L.V. Digital realization of frequency insensitive phase shifter for reactive var-hour meters // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000. – vol. 49, no. 4. – pp. 802-808.
5. Spasojevic B. The time domain method for power line reactive energy measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007. – vol. 56, no. 5. – pp. 2033-2042.
6. Mihalyn S.N. Problemy cifrovoj obrabotki signalov v sisteme avtomatizirovannogo kontrolya kachestva i ucheta kolichestva elektroenergii (ASKUE) / S.N. Mihalyn, V.M. Gevorkyan // Vestnik MEI. – 2005. – №1. – S. 86-92.
7. Serov A.N. The Influence of Power Frequency Deviation on the Active and Reactive Power Measurement Error with the Application of DFT / A.N. Serov, A. Novitskiy, A.A. Shatokhin, S. Schlegel, E.A. Dolgacheva, D. Westermann // 20th International Symposium on Power Electronics (Ee), 2019. – pp. 1-6.
8. Lima M. A method of Dynamic Resampling for DFT-based harmonic analysis under time-varying frequency conditions / M. Lima, J. de Carvalho, D. Coury, A. Cerqueira, C. Duque // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010), 2010. – pp. 1-6.
9. Begovic M.M. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics / M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke // IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. – vol. 8, no. 2. – pp. 480-486.
10. Serov A.N. Influence of Voltage and Current Samples Errors on the Reactive Power Measurement Error / A.N. Serov, N.A. Serov, I.P. Konchalovsky // XXX International Scientific Symposium 'Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2020. – pp. 1–6.

¹*Серов Андрей Николаевич, к.т.н., доцент, SerovAN@mpei.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»*

²Иваненко Кирилл Андреевич, ассистент, IvanenkoKA@mpei.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

³Золкин Дмитрий Сергеевич, db_dept@rupto.ru, Россия, Москва, Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС, Роспатент)

APPLICATION OF THE GOERTZEL TRANSDUCER FOR REACTIVE POWER PARAMETERS MEASUREMENT

A.N. Serov, K.A. Ivanenko, D.S. Zolkin

At present, for the power quality parameters measurement instruments, it is required to measure following reactive power parameters: reactive power of individual harmonics, reactive power of fundamental spectral component and reactive power in a given frequency band. Spectral analysis is effective for measurement all of these parameters. In the case of measurement a small number of harmonics, it seems effective to use the Goertzel transducer for solving this problem. The paper considers the methodological measurement errors of reactive power parameters associated with the frequency deviation from its nominal value. An approach is proposed to reduce this error, based on the adjustment of the number of processed samples to the value of the input signal frequency. Expressions are obtained that make it possible to estimate the measurement errors of all three reactive power parameters. The options for the implementation of the Goertzel transducer for solving the specified problem are considered. A separate implementation option is presented, based on adjusting the number of samples to the frequency value. A simulation model of the measurement transducer is performed in Matlab/Simulink.

Key words: reactive power, discrete Fourier transform, Goertzel transducer, measurement error, frequency deviation.

Serov Andrey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, SerovAN@mpei.ru, Russia, Moscow, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”

Ivanenko Kirill Andreevich, assistant, IvanenkoKA@mpei.ru, Russia, Moscow, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”

Zolkin Dmitry Sergeevich, db_dept@rupto.ru, Russia, Moscow, Federal Institute of Industrial Property (FIPS, Rospatent)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ ДЕСАТУРАЦИИ ДЛЯ АППАРАТА ЖИДКОСТНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

Балакин А.И.¹, Поливцев В.В.², Титков В.А.³

Аннотация. Рассмотрена функциональная схема установки для испытания модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких. Подобраны датчики для растворенных кислорода и углекислого газа. Разработана программа проведения испытаний модуля десатурации и приведены результаты его экспериментальных исследований.

Ключевые слова. Десатурация, дыхательная жидкость, перфторуглерод, концентрация кислорода, концентрация углекислого газа, датчик растворенного кислорода, датчик растворенного углекислого газа.

В настоящее время метод жидкостного дыхания (ЖД) является одним из перспективных направлений в создании не только средств индивидуального спасения подводников с больших глубин, но и для применения в медицинских целях [1-6]. Однако следует отметить, что аппараты, применяемые в настоящий момент для проведения экспериментальных исследований, являются аппаратами открытого типа, в которых не предусмотрена регенерация дыхательной жидкости [7-10]. Разработка аппарата с жидкостной искусственной вентиляцией легких замкнутого цикла связана в том числе с разработкой и экспериментальными исследованиями модуля десатурации, позволяющего удалять все газы из дыхательной жидкости [11].

В настоящий момент разработана конструкция модуля десатурации аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких, на основе использования ультразвукового поточного газоудалителя. Для оценки характеристик работы данного модуля необходимо разработать конструкцию экспериментального стенда и произвести подбор измерительных датчиков, позволяющих анализировать содержание растворенного в жидкости углекислого газа и кислорода.

В результате проведенного обзора датчиков сделан вывод, что в настоящий момент отсутствуют специальные датчики используемые для определения концентрации кислорода и углекислого газа в перфторуглероде, однако для данной задачи возможно использования соответствующих датчиков для воды.

Для экспериментального стенда были выбраны следующие преобразователи:

- 1) датчик растворенного кислорода АКТАКОМ АТЕ-3012, характеристики которого приведены в таблице 1.

- 2) датчик растворенного углекислого газа – портативный анализатор растворённого в воде CO₂ OxyGuard CO₂ Portable, характеристики которого приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Технические характеристики датчика кислорода АКТАКОМ АТЕ-3012

Параметр	Значение
Объект измерения и диапазон	
Растворенный кислород	0...20 мг/л
Атмосферный кислород	0...100 %
Температура	0...50 °C
Разрешение	
Растворенный кислород	0,1 мг/л
Атмосферный кислород	0,1 %
Температура	0,1 °C
Компенсационная настройка датчика	
Температура	0...50 °C автоматич.
Соль	0...50 %
Высота	0...8900 м
Погрешность измерения	
Температура	±0,4 мг/л
Атмосферный кислород	±0,7%
Температура	±0,8 °C / 1,5 °F
Общие характеристики	
Время измерения	1 секунда

Таблица 2 – Технические характеристики портативного анализатора растворённого в воде CO₂ OxyGuard CO₂ Portable

Параметр	Значение
Диапазон измерения растворенного углекислого газа	0 ... 50 мг/л.
Диапазон температурной компенсации	3 ... 35 °C.
Практическая точность	до +/- 1 мг/л.
Время отклика:	
в проточной воде	до 5 минут при 20 °C.
в стоячей воде	до 15 минут

Данные преобразователи обладают требуемыми минимально необходимыми характеристиками для использования их в процессе

экспериментальных исследований модуля десатурации для аппарата жидкостной искусственной вентиляции.

Использование модуля десатурации в аппарате жидкостной искусственной вентиляции легких, как было указано ранее, требует экспериментальных исследований, связанных с оценкой его возможностей. В этой связи возникает необходимость разработки программы испытаний. Основные положения программы приводятся ниже.

Объект испытания: конструкция модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата жидкостной искусственной вентиляции легких (ЖИВЛ).

Цель испытаний: оценить возможность использования разрабатываемого модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата ЖИВЛ в условиях будущей эксплуатации, а также характеристики различных режимов его работы.

Требования технического задания для экспериментального образца:

– десатуратор должен позволять удалять из дыхательной жидкости все газы;

– применяемые измерительные датчики и приборы должны соответствовать классу точности не более 0,5% и должны передавать информацию с возможностью вывода на монитор с ее последующим сохранением.

Функциональная схема установки для испытания модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата ЖИВЛ представлена на **Рис.1**.

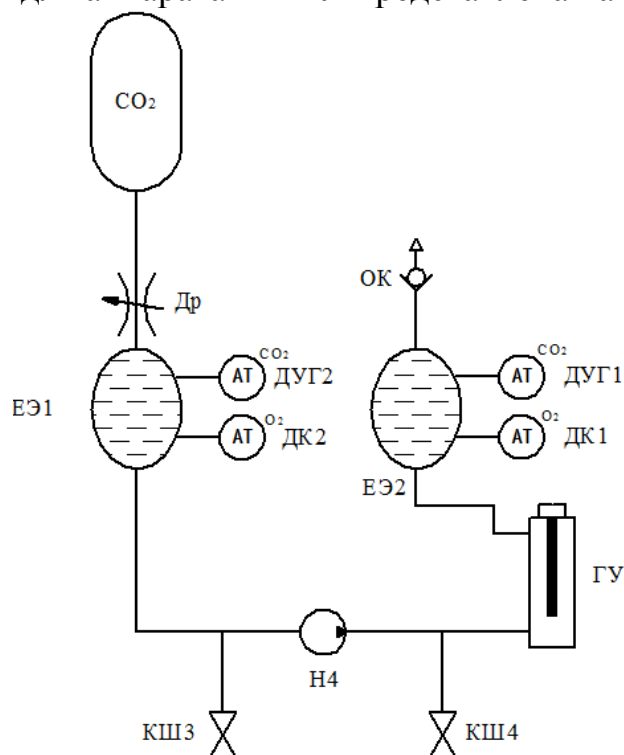


Рис.1 – Функциональная схема установки для испытания модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата ЖИВЛ

Перекачка жидкости из емкости ЕЭ1 в емкость ЕЭ2 осуществляется при помощи насоса Н4. При этом жидкость из емкости ЕЭ1 подается в ультразвуковой газоудалитель ГУ, в котором ультразвуковой генератор создает интенсивную кавитацию и происходит выделение газов из жидкости. Далее жидкость поступает в емкость ЕЭ2. В этой емкости происходит удаление газов через обратный клапан ОК.

Шаровые краны КШЗ-КШ4 используются для наполнения и опорожнения жидкостью испытательного контура. Углекислый газ подается от баллона с CO₂ его расход регулируется дросселем Др.

В качестве газоудалителя ГУ используется ультразвуковой проточный аппарат серии «Волна-П» УЗАП-1/22-ОП, предназначенный для кавитационной обработки жидких и жидкодисперсных сред в периодическом и проточном режимах, характеристики которого представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики «Волна-П» УЗАП-1/22-ОП

Параметр	Ед. изм.	Значение
Мощность	ВА, не более	1000
Частота ультразвуковых колебаний	кГц	22±1,65
Интенсивность ультразвукового воздействия	Вт/см ²	не менее 15
Время непрерывной работы	ч	8
Колебательная система	мм	640х150
Производительность	л/мин	3-5

Регистрация технических параметров в испытаниях проводится измерительными средствами и приборами, имеющими соответствующий класс точности и поверенными в метрологической лаборатории.

При проведении испытаний определяются значения следующих параметров:

- 1) концентрации растворенного углекислого газа в дыхательной жидкости до десатурации;
- 2) концентрация растворенного кислорода до десатурации;
- 3) концентрации растворенного углекислого газа после десатурации;
- 4) концентрация растворенного кислорода после десатурации.

Отчетная документация экспериментальных исследований оформляется в виде актов испытания экспериментального образца модуля десатурации дыхательной жидкости для аппарата ЖИВЛ, содержащих:

- наименование объекта испытаний;
- список лиц, участвовавших в проведении испытаний;
- цель испытаний;
- сведения о продолжительности и ходе испытаний.

Испытания считаются завершенными после фиксирования результатов в Акте испытаний.

На основе приведенной программы испытаний была разработана методика экспериментальных исследований и проведены испытания различных режимов работы модуля дестатурации. В частности, выполнялась проверка концентрации кислорода в перфторуглеродной жидкости без оксигенации и с оксигенацией жидкости в начальной емкости. Рассматривались различные схемы подключения двух проточных газоудалителей. Результаты экспериментов приведены в таблицах 4 – 7.

Таблица 4 – Параллельная схема соединения без оксигенации

Параметр	Значение
Мощность	100 %
Время работы	2 мин
Концентрация кислорода: до дегазации после дегазации	11,4 мг/л 9,5 мг/л
Производительность	7,1 л/мин

Таблица 5 – Параллельная схема соединения с оксигенацией

Параметр	Значение
Время оксигенации	40 мин.
Мощность	100 %
Время работы	2 мин
Концентрация кислорода: до дегазации после дегазации	32,3 мг/л 22,2 мг/л
Производительность	6,76 л/мин

Таблица 6 – Последовательная схема соединения без оксигенации

Параметр	Значение
Мощность	100 %
Время работы	2 мин
Концентрация кислорода: до дегазации после дегазации	8,6 мг/л 7,0 мг/л
Производительность	6,72 л/мин

Таблица 7 – Последовательная схема соединения с оксигенацией

Параметр	Значение
Время оксигенации	40 мин.
Мощность	100 %
Время работы	2 мин
Концентрация кислорода: до дегазации после дегазации	33,9 мг/л 22,2 мг/л
Производительность	7,1 л/мин

На основе результатов проведенных экспериментов были построены графические зависимости концентрации кислорода от времени десатурации приведены на Рис.2,3.

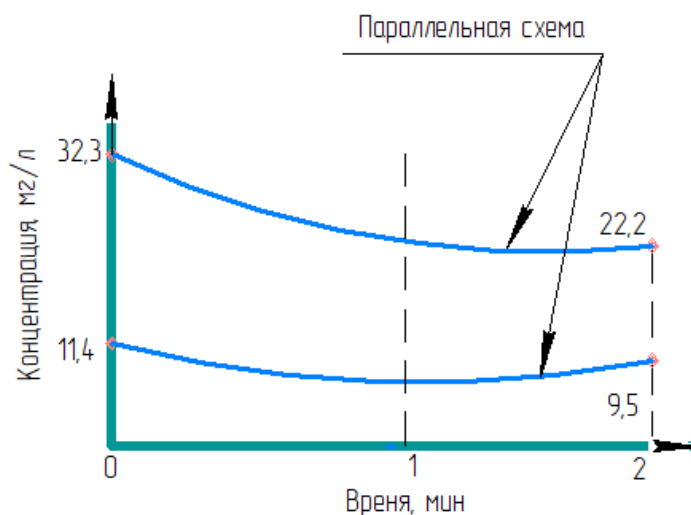


Рис.2 – График эксперимента, параллельное соединение

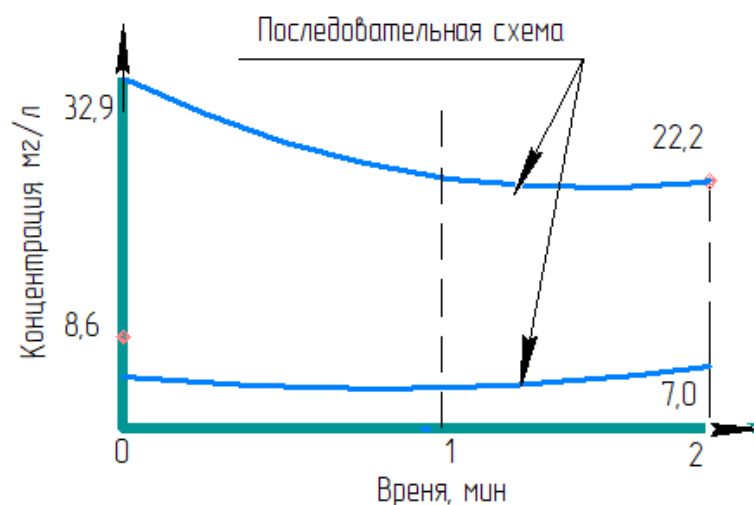


Рис.3 – График эксперимента, последовательное соединение

Выводы:

1. Проанализировав результаты экспериментов, приведенные на **Рис.2,3**, сделали вывод, что процесс дегазации последовательной схемой является преимущественным.

2. Подтверждены теоретические предположения о возможном использовании модуля десатурации дыхательной жидкости в аппарате жидкостной искусственной вентиляции легких замкнутого типа.

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

Библиографический список

1. Поливцев В.П. Экспериментальные морские исследования технологии жидкостного дыхания для ныряния/всплытия биологических объектов в капсуле на глубину до 1500 метров / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев, К.Н. Осипов. // Международная конференция по автоматике и энергетике ICAE 2021, Том 2096, 7-8 октября 2021 г., Владивосток, С.1-10, Россия.

2. Поливцев В.П. Исследование технологии жидкостного дыхания методом погружения /всплытия биологического объекта в гидравлической камере с высоким давлением / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» Научно-технический журнал. – 2021. – №4 (348), С. 183-189.

3. Каисерс У. Жидкостная вентиляция / У. Каисерс, К. Келлы, Т. Бусч // British Journal of Anaesthesia. – 2003. – 91 (1): 143-51.

4. Надо М. Оптимальный контроль дыхания. Температура перфторуглерода для сверхбыстрой индукции гипотермии по сумме жидкостная вентиляция в модели взрослого пациента / М. Надо, М. Сейдж, М. Кольхауэр и др. // IEEE Trans Biomed Eng. – 2017.

5. Шалфей М. Эффект сверхбыстрой легкой гипотермии с использованием общей жидкости вентиляция по гемодинамике и механике дыхания / М Шалфей, М Надо, М. Кольхауэр и др. // Криобиология. – 2017. – С. 99-101.

6. Кольхауэр М. Жидкостная вентиляция для индукции сверхбыстрой гипотермии у науки о реаниматологии: обзор. / М. Кольхауэр, А. Бердо, Р.Е. Кербер и др. // Гипотермия Temp Manag. – 2016. – (2). –С. 63–70.

7. Модуль жидкостного дыхания в условиях гипербарии для модельного биообъекта: патент RU № 203446, МПК А61Н 31/02/

Е.В. Пашков, В.П. Поливцев, Д.И. Манчук, В.В. Поливцев; опубликовано 06.04.2021, Бюл. №10.

8. Аппарат вентилиции легких жидкостью: патент RU № 2732639, МПК А61Н 31/00, А61М 16/00/ Е.Ю. Бонитенко, А.А. Тоньшин, Д.В. Глухов и др.; опубликовано 21.09.2020, Бюл. №27.

9. Мишо П. Глава: Прототип жидкостного вентилятора для доклинических исследований тотальной жидкостной вентилиции, биоинженерия / П. Мишо, Р. Робер, Б. Бодри и др. – In Tech Изд-во, 2011.

10. Жидкостный вентилятор и способ индукции приливной жидкостной вентилиции и/или гипертермия П. Мишо, Р. Тиссье, М. Надо, М. Кольхауэр, Дж. Вандамм, Ж. Мус-со; Канада, L80011814WO, 12 апреля 2019 г.

11. Поливцев В.П. Исследование технологии жидкостного дыхания для удаления азота из организма биообъекта посредством информационно-измерительной системы / В.П. Поливцев, А.Н. Круговой, М.И. Калинин, В.В. Поливцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Научно-технический журнал. – 2021. – №6 (350). – С. 172-186.

Bibliograficheskiy spisok

1. Polivtsev V.P. Eksperimental'nyye morskkiye tekhnologii issledovaniya zhidkostnogo dykhaniya dlya nyryaniya/vsplytiya biologicheskikh ob"yektov v kapsulakh na urovne do 1500 metrov / V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev, K.N. Osipov. // Mezhdunarodnaya konferentsiya po avtomatike i energetike ICAE 2021, Tom 2096, 7-8 oktyabrya 2021 g., Vladivostok, C.1-10, Rossiya.

2. Polivtsev V.P. Issledovaniye tekhnologii zhidkostnogo dykhaniya metodom pogruzheniya /vsplytiya biologicheskogo ob"yekta v gidravlicheskoй nagruzke s vysokim davleniyem / V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev // «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologiy» Nauchno-tekhnicheskii zhurnal. – 2021. – №4 (348), s. 183-189.

3. Kayzers U. Zhidkostnaya ventilyatsiya / U. Kayzers, K. Kelli, T. Bushch // Britanskiy zhurnal anestezi. – 2003. – 91 (1): 143-51.

4. Nado M. Optimal'nyy kontrol' dykhaniya. Temperatura perftorugleroda dlya sverkhbystroy otsenki gipotermii po summe zhidkostnoy ventilyatsii v modelyakh vzroslykh patsiyentov / M. Nado, M. Seydzh, M. Kol'khauer i dr. // IEEE Trans Biomed Eng. – 2017.

5. Shalfey M. Effekt sverkhbystroy medlennoy gipotermii s ispol'zovaniyem obshchey zhidkosti ventilyatsii po gemodinamike i mekhanike dykhaniya / M. Shalfey, M. Nado, M. Kol'khauer i dr.// Kriobiologiya. – 2017. – S. 99-101.

6. Kol'khauer M. Zhidkostnaya ventilyatsiya dlya patsiyentov so sverkhbystroy gipotermiyey v nauke o reanimatologii: obzor. / M. Kol'khauer,

A. Berdo, R.Ye. Kerber i dr. // Gipotermiya Temp Manag. – 2016. – (2). –S. 63–70.

7. Modul' zhidkostnogo dykhaniya v usloviyakh giperbarii dlya model'nogo bioob'yekta: patent RU № 203446, MPK A61N 31/02/ Ye.V. Pashkov, V.P. Polivtsev, D.I. Manchuk, V.V. Polivtsev; opublikovano 06.04.2021, Byul. №10.

8. Apparat ventilyatsii legkikh: patent RU № 2732639, MPK A61N 31/00, A61M 16/00/ Ye.YU. Bonitenko, A.A. Ton'shin, D.V. Glukhov i dr.; opublikovano 21.09.2020, Byul. №27.

9. Misho P. Glava: Prototip zhidkostnogo ventilyatora dlya doklinicheskikh issledovaniy total'noy zhidkostnoy ventilyatsii, bioinzhenneriya / P. Misho, R. Rober, B. Bodri i dr. – In Tech Izd-vo, 2011.

10. Zhidkostnyy ventilyator i nablyudayutsya sposoby prilivnoy zhidkostnoy ventilyatsii i/ili gipertermiya P. Misho, R. Tiss'ye, M. Nado, M. Kol'khauer, Dzh. Vandamm, ZH. Mus-so; Kanada, L80011814WO, 12 aprelya 2019 g.

11. Polivtsev V.P. Issledovaniye tekhnologii zhidkostnogo dykhaniya dlya udaleniya azota iz organizma bioob'yekta posredstvom informatsionno-izmeritel'noy sistemy / V.P. Polivtsev, A.N. Krugovoy, M.I. Kalinin, V.V. Polivtsev // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii Nauchno-tekhnicheskii zhurnal. – 2021.– №6 (350). – S. 172-186.

¹*Балакин Алексей Игоревич, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, AIBalakin@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

²*Поливцев Владимир Викторович, руководитель группы, VVPolivtsev@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

³*Титков Владислав Анатольевич, инженер I категории, VATitkov@sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет*

INVESTIGATION OF THE DESATURATION MODULE FOR A LIQUID ARTIFICIAL LUNG VENTILATION DEVICE

A.I. Balakin, V.V. Polivtsev, V.A. Titkov

Abstract. The functional scheme of the installation for testing the respiratory fluid desaturation module for a liquid artificial lung ventilation device is considered. Sensors for dissolved oxygen and carbon dioxide have been selected. A program for testing the desaturation module has been

developed and the results of its experimental studies are presented.

Keywords: desaturation, respiratory fluid, perfluorocarbon, oxygen concentration, carbon dioxide concentration, dissolved oxygen sensor, dissolved carbon dioxide sensor.

Balakin Alexey Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Leading researcher, AIBalakin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Polivtsev Vladimir Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Leading researcher, VVPolivtsev@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Titkov Vladislav Anatolyevich, Engineer of the 1st category, VATitkov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал

Выпуск №2(18) 2022 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(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.

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.

№ рег. СМИ: ПИ №ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 01.12.2022. Заказ 018К. Дата выхода в свет: 09.12.2022. Тираж: 50 экз.

Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 11.2.

Севастополь, 2022