

# **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА**

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (22) декабрь 2020 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г. И. Носова»

## О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освящение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматизации, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

**Основные направления журнала:** Автоматизированные системы управления; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

## Редакция и редакционный совет

### Редакционный совет

*Председатель редакционного совета:*

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

*Заместитель председателя редакционного совета:*

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

*Члены редакционного совета:*

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ, Челябинск)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ, Челябинск)

Ячиков Игорь Михайлович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ, Екатеринбург)

Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков)

Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (МГТУ им. Г.И. Носова)

### Редакция

*Председатель редакционной коллегии*

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор

*Главный редактор:*

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук

## Контакты

**Главный редактор:** Андреев Сергей Михайлович  
Тел.: (3519) 29-85-27

**Редакционная  
коллегия:** Парсункин Борис Николаевич  
Тел.: (3519) 29-84-32  
E-mail: [atp@magtu.ru](mailto:atp@magtu.ru)

**Адрес  
редакции:** 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.  
E-mail: [atp@magtu.ru](mailto:atp@magtu.ru)

Выходит в свет 12.2020.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### Математическое моделирование технологических систем и объектов управления

*Е.Э. Бодров, Н.И. Киртянов*

Подготовка обучающего набора данных для выполнения предиктивного анализа неисправностей планетарного редуктора мотор-колеса БелАЗа на основе нейронных сетей .. 4

*А.В. Варганова, Д.А. Петров, Д.О. Позин*

Автоматизированное построение технико-экономических моделей котлоагрегатов промышленных электростанций ..... 11

### Автоматизированные системы управления

*Ю.А. Попова, М.Д. Терех*

Специфика проектирования автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов ..... 14

*Е.А. Дудоров, С.М. Андреев, К.А. Котова*

Оптимизация управления процессом селективного лазерного спекания с целью повышения качества изделий аддитивного производства для космических программ ..... 18

### Автоматизированные информационные системы

*Я.А. Степанова, С.А. Зыкин*

Сравнение алгоритмов для решения задачи геометрического покрытия ..... 25

### Технические средства автоматизации

*И.П. Попов*

Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента инерции ..... 29

*И.П. Попов*

Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин ..... 32

### Mathematical simulation of control systems and objects

*E.E. Bodrov, N.I. Kirtyanov*

Preparation of a training dataset for performing predictive analysis of the BelAZ wheel motor planetary gearbox malfunctions based on neural network ..... 4

*A.V. Varganova, D.A. Petrov, D.O. Pozin*

Automated construction of technical and economic models of boiler units of industrial power plants ..... 11

### Automatic control systems

*Y.A. Popova, M.D. Terekh*

Specificity of designing an au-tomated system for monitoring and accounting of energy resources ..... 14

*E.A. Dudorov, S.M. Andreev, K.A. Kotova*

Optimizing the control of the selective laser sintering process to increase the quality of additive products for space programs ..... 18

### Automated Information Systems

*Ya.A. Stepanova, S.A. Zykin*

Comparison of algorithms for solving the problem of geometric coverage ..... 25

### Automation equipment

*I.P. Popov*

Artificial capacitive flywheel with the possibility of automatic regulation of the moment of inertia ..... 29

*I.P. Popov*

Minimizing environmental damage from vibration machines ..... 32

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

## Оформление

**Научные статьи**, направляемые для публикации в журнал, **должны содержать**: название статьи; - сведения об авторах (Фамилия, Инициалы; место работы, город, страна; электронный адрес), количество авторов - не более 5; аннотацию в объеме от 100 до 250 слов; перечень ключевых слов или фраз в объеме не более 7; список литературы, не менее 8 ссылок. В случае представления статьи на русском языке указанные выше пункты должны быть представлены также и в англоязычном варианте. Если в оригинале статья написана на английском языке, то дополнительно эти сведения рекомендуется привести на русском языке.

**Статью следует набирать в шаблоне**, представленном на информационной странице портала ФГБОУ ВО "МГТУ" [www.mgtu.ru](http://www.mgtu.ru) (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

**Рекомендуемая структура статьи**: УДК. Аффiliation (фамилии авторов и место их работы). Название статьи. Аннотация. Ключевые слова. Введение. Методы исследования. ... Результаты. Заключение. Источник финансирования (при необходимости). Список литературы. Информация на английском (аффiliation, аннотация, ключевые слова, список литературы).

**При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил**:

Объем рукописи статьи, оформленный в соответствии с приведенными требованиями, не должен превышать: обзорной статьи более 10 страниц; статьи более 6 страниц; краткого сообщения более 2 страниц.

**Самоецитирование**: не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

**Размерности величин** выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

**В сопровождение рукописи** статьи авторами должны быть направлены на официальный адрес электронной почты редакции журнала, следующие документы: **экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати (цветной скан в формате PDF). Работы, выполненные авторами в инициативном порядке, представления экспертного заключения не требуют; **сведения об авторах** (Фамилия Имя и Отчество полностью, ученая степень и ученое звание, место работы, город, страна, электронный адрес) с указанием одного из авторов, который будет взаимодействовать с редакцией.

## Пример оформления

УДК 681.5.015.32

### ДОСТОВЕРНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Б.Н. Парсунки<sup>1</sup>, Т.Г. Сухоносова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> [tgubuhova@gmail.com](mailto:tgubuhova@gmail.com)

**Аннотация.** В работе рассмотрена математическая модель программной реализации достоверного и оперативного метода определения значений динамических параметров управляемого технологического процесса для определения динамических параметров настройки микропроцессорных контуров управления в условиях интенсивного негативного воздействия технологических и организационных возмущений, характерных для реального производства. Эффективное решение поставленной задачи обеспечивается использованием уникальных свойств ортогональных функций Уолша, позволяющих формировать таких планов тестирующих воздействий, которые полностью компенсируют негативное влияние возмущающих воздействий на интегральную оценку отклика (реакцию) управляемого параметра на тестирующее входное воздействие. Использование предлагаемого метода особенно целесообразно при решении многих практических задач, когда необходимо получать достоверные результаты в условиях действия различных возмущающих факторов влияющих на точность определяемого параметра.

**Ключевые слова:** динамические параметры объекта управления, определение параметров объекта, функция Уолша, компенсация возмущений, тестирующие воздействия, интегральная оценка.

#### Введение

При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта  $K_{об}$ , постоянной

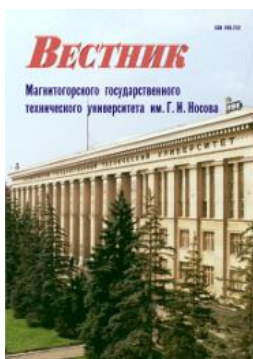
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1. [2]. Динамические параметры, полученные при обработке экспериментальных кривых разгона на рис. 1 представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы

## Предоставление материалов

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: [atp@mgtu.ru](mailto:atp@mgtu.ru) текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

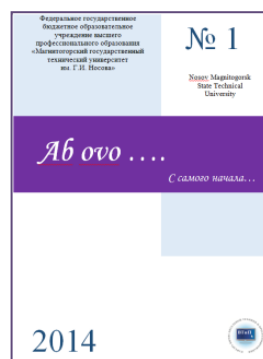
## Другие рекомендуемые периодические издания



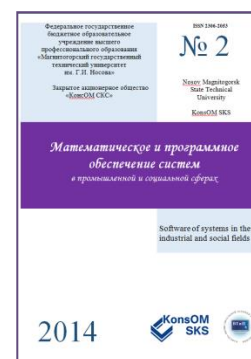
Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 681.527

**ПОДГОТОВКА ОБУЧАЮЩЕГО НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ  
ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА  
МОТОР-КОЛЕСА БЕЛАЗА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**Е.Э. Бодров, Н.И. Киртянов**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, Россия

fortheartist@mail.ru

**Аннотация.** В работе показана актуальность задачи диагностирования технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса планетарного редуктора мотор-колеса самосвала БелАЗ, определяемая тем, что из-за особенностей эксплуатации карьерной техники и больших переменных нагрузок на редуктор, он может выйти из строя в любой момент, из-за того, что время его безотказной работы является случайной величиной. Решением данной проблемы может быть применение для диагностики нейронной сети, обучаемой на массиве диагностических данных за прошлые и текущие периоды эксплуатации самосвала. В связи с этим целью данной работы было определение значимых и достоверных диагностических данных, которые могут быть использованы для дальнейшего предиктивного анализа и прогнозирования момента выхода редуктора из строя. В ходе работы было выявлено достаточное количество диагностических признаков, полученных в результате частотного анализа сигнала вибрации с двух акселерометров, установленных по одному на каждый из редукторов, и определены пороговые значения амплитуд вибрации для всех признаков. Система на основе нейронных сетей, использующая предлагаемый в работе набор данных, позволит проводить безразборную оценку технического состояния редуктора мотор-колеса и прогноз его остаточного ресурса. Данная система обеспечит своевременное предупреждение о предаварийном состоянии редуктора для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом самосвала из строя при выполнении работы в карьере. Применение системы обеспечит повышение сроков службы самосвалов, снижение времени простоя машин, сокращение затрат на обслуживание и ремонт.

**Ключевые слова:** БелАЗ, самосвал, планетарный редуктор, вибродиагностика, предиктивный анализ, прогнозирование остаточного ресурса, нейронные сети, данные.

#### ВВЕДЕНИЕ

Самыми ответственными и наиболее часто выходящими из строя узлами тяжелых карьерных самосвалов являются редукторы мотор-колес. Согласно исследованиям, подробно описанным в [1], наиболее частыми причинами простоев техники были отказы редукторов мотор-колес. Главная причина аварийной поломки редуктора мотор-колеса – высокие динамические нагрузки, вызывающие интенсивный износ шестерен и подшипников редукторов [2].

Для того чтобы снизить непроизводительные затраты при эксплуатации карьерных самосвалов следует перейти от плано-предупредительной системы обслуживания оборудования и техники к обслуживанию по их фактическому состоянию. Этого можно достичь за счет разработки эффективных аналитических и методических инструментов оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса механизмов, машин. Многие исследовательские центры и ведущие мировые производители ищут решения этих проблем.

Для того чтобы спрогнозировать остаточный ресурс, необходимо решить комплекс задач:

- диагностировать состояние объекта на данный момент;
- спрогнозировать, как это состояние изменится в будущем;
- на основании прогноза получить рекомендацию по оставшемуся сроку службы;
- оценить вероятность различных отказов с целью их предотвращения.

На практике все чаще используются инструментальные, методические средства контроля технического состояния, вибромониторинга механических систем [3]. Для эффективного контроля технического состояния механизмов и более точного прогнозирования ресурса наиболее ответственных элементов используются инструменты, созданные в связи с развитием компьютерных технологий, микропроцессорной техники и алгоритмов реализации нейронных сетей [4-7].

Чтобы применить результаты подобных исследований на практике, необходимо разработать научные и практические приложения, особенно такие, как прогноз оставшегося ресурса шестерен и подшипников на основе данных мониторинга динамики развития вибрации в редукторе мотор-колеса во время эксплуатации самосвала. Кроме того, важно оценить состояние агрегатов трансмиссии.

Поскольку чаще всего аварийный отказ технологического оборудования происходит из-за выхода из строя подшипников, наибольшее развитие получили инструменты для диагностики подшипников качения [8]. Кроме того, в литературе достаточно хорошо изучены вопросы диагностики технического состояния редукторов.

Однако в опубликованных описаниях практически отсутствуют конкретные методы и примеры практического использования средств диагностики для прогнозирования остаточного ресурса зубчатых колес и приводных механизмов тяжёлых карьерных самосвалов, которые в силу своей специфики как объект диагностирования отличаются от стационарных редукторов.

С развитием современных вычислительных средств, позволяющих строить нейронные сети и искусственный интеллект, задачу прогнозирования остаточного ресурса редуктора мотор-колеса можно свести к обучению соответствующей нейронной сети с помощью массива диагностических данных [9,10].

Целью данной работы является анализ и подготовка диагностических данных, которые могут быть использованы при обучении нейронной сети, выполняющей предиктивный анализ неисправностей планетарного редуктора мотор-колеса БелАЗа.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- анализ научной литературы;
- анализ мотор-колеса БелАЗа как объекта диагностирования, режимов его работы и особенностей эксплуатации карьерных самосвалов;
- выявление диагностических признаков неисправностей редуктора мотор-колеса БелАЗа и расчет частот его дефектов.

#### ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ

При эксплуатации карьерных самосвалов иногда происходит частичный или полный выход из строя мотор-редуктора колес.

Такая потеря работоспособности может быть обусловлена разными причинами:

- особенности конструкции;
- отклонения в технологии;
- природно-климатические условия эксплуатации;
- естественное старение;
- особенности управления техникой.

Время безотказной работы машины является величиной случайной, так как наработка на отказ каждой сборочной единицы РМК различна и колеблется в широких пределах [2].

Поскольку у каждого редуктора мотор-колеса может быть различным время наработки на отказ, поломка мотор-колеса может произойти в любой момент. Это приводит к остановке самосвала. Таким образом, время, в течение которого самосвал работоспособен, также является случайной величиной. Это, в свою очередь, приводит к трудностям в организации работ, поддерживающих оборудование в рабочем состоянии.

Такие незапланированные простои негативно влияют на прибыльность всего предприятия. Кроме того, по мере старения и износа оборудования, срок его ремонта также

увеличивается [11]. Поэтому техническое состояние сборочных единиц самосвала нужно всегда контролировать и поддерживать в работоспособном состоянии. Для этого проводится комплекс мероприятий технического обслуживания. Чтобы сократить время, затрачиваемое на обслуживание, при сохранении надежности, необходимо вовремя проводить диагностику.

По результатам анализа публикаций [12-16], в которых рассматривается оперативная оценка технического состояния приводных механизмов на базе шестерен, а также методы и средства прогнозирования оставшегося ресурса трансмиссионных систем, становится очевидным, что наиболее перспективными являются методы безразборного контроля динамических характеристик приводных механизмов путем постоянного или периодического контроля их вибрационных параметров.

Все грузовики БелАЗ оснащены системой контроля загрузки, работающей на базе бортового компьютера [16]. Эта система записывает в память компьютера различные параметры: вес груза, давление в шинах, расход топлива, скорость и другие рабочие параметры. Чтобы предотвратить аварийный выход из строя техники и снизить затраты на техническое обслуживание мировые лидеры по производству тяжелой карьерной техники создают и оснащают производимую ими технику системой оценки технического состояния наиболее важных узлов. Однако на самосвалах БелАЗ нет систем оценки технического состояния редукторов мотор-колес.

Большая часть систем, которые устанавливаются на отечественные и зарубежные машины является системами диспетчеризации. Эти системы контролируют и учитывают в реальном режиме загрузку, расход топлива, местоположение, скорость, время простоя, нарушения режимов работы. В проанализированных публикациях не представлены эффективные системы для диагностики технического состояния передач узлов трансмиссии.

При разработке и создании средств диагностики необходимо учитывать особенности функционирования зубчатых передач. Сравнительно низкая степень изготовления деталей и высокие динамические нагрузки создают условия для развития локальных дефектов, неисправностей, а затем возникают ударные импульсы при взаимодействии кинематических пар компонентов и деталей. При эксплуатации зубчатых механизмов, из-за дефектов и неисправностей возникают серии импульсов. Природа этих импульсов имеет широкополосный, низкоамплитудный спектр и часто принимается за шум [17].

Степень выраженности таких дефектов нарастает лавинообразно и следствием этого может быть аварийный выход из строя техники. Для предотвращения этого желательно информацию о возможных неисправностях получать заранее.

Постоянно меняющиеся скорости и нагрузки – другая особенность зубчатых передач трансмиссии. Внешние динамические факторы, зависящие от загрузки автомобиля, квалификации водителя, покрытия дороги и рельефа значительно влияют на вибрационные характеристики трансмиссии в дополнение к внутренним факторам. Вследствие этого непрерывно меняется сам характер вибрации (частота и амплитуда) [17-18]. Это несколько ограничивает применение спектрального анализа. Чтобы ре-

шить эту проблему нужно синхронизировать измерения вибраций и частоту вращения элементов редукторов мотор-колес. Для этого в систему в качестве входных параметров обязательно должны быть заведены данные о текущей скорости самосвала.

Еще одной сложностью при диагностировании редукторов мотор-колес является значительная удаленность диагностируемых элементов редуктора от того места, куда возможно установить датчик вибрации. Вибрация с увеличением расстояния значительно затухает, что искажает реальную картину и влияет на диагностику неисправностей. Кроме того, у каждого диагностируемого агрегата свои условия эксплуатации и износа, зависящие от направления изгибов дороги, по которой едет самосвал от рельефа и т.д. Это также необходимо учитывать.

На сегодняшний день не существует систем, способных оценить во время эксплуатации текущее состояние приводов и предупредить водителя о том, что машина находится в предаварийном состоянии.

#### РАСЧЕТ ЧАСТОТ ДЕФЕКТОВ РЕДУКТОРА МОТОР-КОЛЕСА БЕЛАЗА

Электромотор-колесо состоит из тягового электродвигателя, редуктора, ступицы заднего колеса, тормозных механизмов, датчика ограничения скорости [19]. Редуктор мотор-колеса установлен в ступице заднего колеса и является дифференциальным двухрядным с прямыми цилиндрическими шестернями (рис. 1).

В корпусе редуктора, на осях установлены сателлиты второго ряда. Ступица заднего колеса установлена на корпусе на двух роликовых конических подшипниках. К ступице крепятся коронная шестерня второго ряда и с деталями первого ряда, ведущая крышка редуктора.

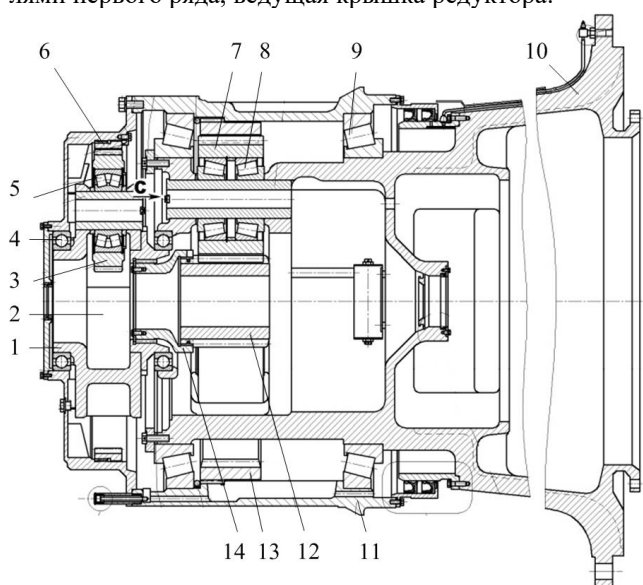


Рис. 1. Чертеж редуктора электромотор-колеса:

1 – водило с сателлитами; 2 – солнечная шестерня первого ряда; 3 – сателлит первого ряда; 4, 5, 8, 9 – подшипники; 6 – шестерня коронная первого ряда; 7 – сателлит второго ряда; 10 – корпус редуктора мотор-колеса; 11 – ступица заднего колеса; 12 – шестерня солнечная второго ряда; 13 – коронная шестерня второго ряда; 14 – муфта зубчатая

Солнечная шестерня первого ряда находится в зацеплении с тремя сателлитами, установленными на сферических подшипниках на осях в водиле первого ряда. Сателлиты зацепляются с коронной шестерней первого ряда. Коронная шестерня через шлицы ведущей крышки передает крутящий момент на ступицу. Водило установлено на двух шариковых подшипниках. В шлицевое отверстие фланца водила первого ряда установлены солнечная шестерня второго ряда и зубчатая муфта, необходимая для устранения перекосов солнечной шестерни. Солнечная шестерня второго ряда входит в зацепление с тремя сателлитами второго ряда, а сателлиты с коронной шестерней. Коронная шестерня передает крутящий момент на ступицу. Сателлиты второго ряда вращаются на подшипниках, которые установлены на осях в корпусе редуктора.

Расчет частот дефектов редуктора мотор-колеса будем проводить для БелАЗа 75306. Параметры БелАЗа и редуктора приведены в таблицах 1-3, соответственно.

Таблица 1  
Параметры БелАЗа 75306

№ п/п	Параметр	Значение
1	Дефект наружного кольца подшипника $f_n$	25
2	Дефект внутреннего кольца подшипника $f_b$	14
3	Дефект тел качения подшипника $f_{тк}$	1,786

Таблица 2  
Параметры редуктора мотор-колеса

№ п/п	Параметр	Количество зубьев	Частота вращения, Гц
1	Солнечная шестерня (первый ряд)	24	8,14
2	Солнечная шестерня (второй ряд)	21	1,39
3	Сателлиты (первый ряд)	44	0,92
4	Сателлиты (второй ряд)	30	0,97
5	Коронная шестерня (первый ряд)	117	0,35
6	Коронная шестерня (второй ряд)	84	0,35

Таблица 3  
Подшипники редуктора мотор-колеса

№ п/п	Элемент редуктора	Тип подшипника	Кол-во подшипников
1	Сателлиты первого ряда	30-3624AMHK5	3
2	Сателлиты второго ряда	7624A	6
3	Водило первого ряда	1000964Л	2
4	Подшипник ступицы	6-10079/900AXM	2

Частота вращения каждой шестерни получена расчетным путем с помощью следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_{r1} &= f_{r2} = \frac{V}{2\pi \cdot R_w}; \\ f_{p1} &= f_{r1} \cdot \frac{k_{r1}}{k_{p1}}; \\ f_{p2} &= f_{r2} \cdot \frac{k_{r2}}{k_{p2}}; \\ f_c &= f_{s2}; \\ f_{s1} &= f_c \cdot \left(1 + \frac{k_{r1}}{k_{s1}}\right); \\ f_{s2} &= f_{p2} \cdot \frac{k_{p2}}{k_{s2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $f_{r1}, f_{r2}, f_{p1}, f_{p2}, f_{s1}, f_{s2}$  – частота вращения коронной шестерни, сателлитов и солнечной шестерни 1-го и 2-го ряда, соответственно;  $f_c$  – частота вращения водила;  $k_{r1}, k_{r2}, k_{p1}, k_{p2}, k_{s1}, k_{s2}$  – число зубьев коронной шестерни, сателлитов и солнечной шестерни 1-го и 2-го ряда, соответственно;  $V$  – скорость движения самосвала;  $R_w$  – средний радиус колеса.

При использовании данных выражений возникает сложность, вызванная переменной скоростью движения самосвала. Поэтому для упрощения вычислений целесообразно выбрать постоянную скорость движения, провести все расчеты для нее, а затем получить частотные факторы дефектов в безразмерном виде, разделив их на частоту вращения коронной шестерни (см. табл. 2) и умножив на коэффициент, равный

$$k = \frac{1000}{3600} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot R_w} = 0,02475 \quad (2)$$

В качестве базовой скорости была выбрана скорость движения загруженного БелАЗа.

Дефекты зубчатых зацеплений рассчитываются по выражению:

$$f_{tooth} = f_i \cdot k_i, \quad (3)$$

где  $f_{tooth}$  – частота дефекта зубчатой пары;  $f_i$  – частота вращения шестерни (солнечной, коронной или сателлитов);  $k_i$  – частота число зубьев шестерни (солнечной, коронной или сателлитов).

Дефекты подшипников берутся из справочника или рассчитываются по известным из литературы выражениям [20-21]:

$$\left. \begin{aligned} f_{sep} &= \frac{1}{2} \cdot f_i \left(1 - \frac{d_{el}}{d_{sep}} \cdot \cos(\alpha)\right); \\ f_{out} &= \frac{1}{2} \cdot f_i \left(1 - \frac{d_{el}}{d_{sep}} \cdot \cos(\alpha)\right) \cdot Z; \\ f_{in} &= \frac{1}{2} \cdot f_i \left(1 + \frac{d_{el}}{d_{sep}} \cdot \cos(\alpha)\right) \cdot Z; \\ f_{el} &= \frac{1}{2} \cdot f_i \cdot \frac{d_{sep}}{d_{el}} \left(1 - \frac{d_{el}^2}{d_{sep}^2} \cdot \cos^2(\alpha)\right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $f_{sep}, f_{out}, f_{in}, f_{el}$  – частоты дефекта сепаратора, внешнего кольца, внутреннего кольца и тел качения, соответственно;  $d_{el}$  – диаметр тел качения;  $d_{sep}$  – диаметр сепаратора;  $\alpha$  – угол контакта тел качения с дорожками подшипника;  $Z$  – число тел качения.

Рассчитанные по выражениям (1) – (3) диагностические признаки дефектов редуктора мотор-колеса сведены в таблицу 4.

Для дальнейшего использования рассчитанных частотных факторов в системе диагностики, необходимо рассчитать частоты дефектов по следующему выражению:

$$f_{defect,i} = k_{f,i} \cdot V, \quad (5)$$

где  $f_{defect,i}$  – частота  $i$ -го дефекта;  $k_{f,i}$  – частотный фактор  $i$ -го дефекта;  $V$  – текущая скорость движения самосвала.

Анализ конструкции редуктора (см. рис. 1) позволил установить, что датчики вибрации следует разместить на не вращающуюся часть корпуса заднего моста, как показано на рис. 2. Такое расположение датчиков наиболее оптимально и позволяет получить сигнал вибрации с наименьшим затуханием. Датчики необходимо разместить горизонтально, чтобы уменьшить влияние вибрации, вызванной движением самосвала.

Таблица 4

Диагностические признаки редуктора мотор-колеса БелАЗа

Дефекты зубчатых передач				
	Наименование элемента	Частотный фактор дефекта $k_{fi}$		
1	Солнечная шестерня (первый ряд)	39,48		
2	Солнечная шестерня, сателлиты, коронная шестерня (второй ряд)	5,90		
3	Сателлиты, коронная шестерня (первый ряд)	8,18		
Дефекты подшипников				
№ п/п	Наименование элемента	Частотный фактор дефекта $k_{fi}$		
		Внутреннее кольцо	Внешнее кольцо	Тела качения
1	Сателлиты первого ряда	1,76	1,22	0,99
2	Сателлиты второго ряда	1,85	1,29	1,03
3	Водило первого ряда	2,76	2,28	2,89
4	Подшипник ступицы	1,06	0,90	0,50



Места установки датчиков вибрации  
Рис. 2. Задний мост БелАЗа с обозначением мест установки датчиков вибрации



Далее полученный сигнал вибрации подвергается преобразованию в прямой спектр виброскорости. На спектре выделяются все частоты дефектов в пределах частотного окна в  $\pm(5-10)\%$  от расчетной величины. Далее в пределах частотного окна выделяется максимальная амплитуда сигнала вибрации. Эти амплитуды на всех рассчитанных частотах и являются диагностическими признаками, которые могут быть использованы для предиктивного анализа.

В системе необходимо предусмотреть сравнение полученных максимальных величин амплитуды вибрации всех дефектов с пороговыми значениями, соответствующими уровням «Предупреждение» (желтый) и «Останов» (красный), согласно ГОСТ [22]. Для самосвала БелАЗ эти значения составляют 7,1 мм/с (желтый) и 11,2 мм/с (красный). Кроме того, необходимо отбирать для диагностики только те данные, которые были получены в диапазоне рабочих скоростей движения самосвала, примерно от 10 до 25 км/ч.

Система предиктивного анализа и прогнозирования выхода из строя редуктора, построенная на основе нейронных сетей, должна будет анализировать скорость нарастания вибрации и приближения ее к красной границе. Как только красная граница будет достигнута, система должна оповестить обслуживающий персонал о необходимости останова и ремонта машины.

Полученных диагностических признаков достаточно для дальнейшего построения системы предиктивного анализа дефектов редуктора мотор-колеса БелАЗа и прогнозирования его остаточного ресурса на основе нейронных сетей. Для этого необходимо будет провести обучение системы на массиве данных амплитуд виброскорости на рассчитанных частотах дефектов, сравнить эти амплитуды с предельными уровнями, рекомендуемыми ГОСТ, а также предусмотреть возможность задания текущего технического состояния редуктора мотор-колеса, определенно в процессе визуального осмотра. Для более точной диагностики необходимо завести в систему данные о массе руды, загруженной в кузов самосвала, и о его текущей скорости движения.

Необходимо также учесть, что датчики вибрации расположены на значительном удалении от самого редуктора и вибрация может существенно ослабляться. Поэтому предельные уровни при обучении системы могут быть снижены в зависимости от соотношения амплитуды вибрации и фактического состояния диагностируемых узлов редуктора, оцененного при визуальном осмотре.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Предложенный способ оценки остаточного ресурса зубчатых передач и подшипников редуктора мотор-колеса БелАЗа на основе нейронных сетей позволит по результатам вибромониторинга прогнозировать вероятность возможного выхода его из строя.

Для реализации предложенного способа в работе было выполнено:

- анализ мотор-колеса БелАЗа как объекта диагностирования, режимов его работы и особенностей эксплуатации карьерных самосвалов;

- выявление диагностических признаков неисправностей редуктора мотор-колеса БелАЗа и расчет частот его дефектов.

Система на основе нейронных сетей позволит проводить безразборную оценку технического состояния редуктора мотор-колеса и прогноз его остаточного ресурса. Данная система обеспечит своевременное предупреждение о предаварийном состоянии редуктора для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом самосвала из строя при выполнении работы в карьере. Применение системы обеспечит повышение сроков службы самосвалов. Планово-предупредительное обслуживание машин сменится обслуживанием по фактическому состоянию. Благодаря этому снизится время простоя машин, сократятся затраты на обслуживание и ремонт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хорешок А.А. Метод комплексного диагностирования редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов в условиях предприятий ОАО УК Кузбассразрезуголь / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых // Горная промышленность. – 2010. №5(93). – С. 60-64.

2. Ишин Н.Н. Оценка уровня вибраций и остаточного ресурса редукторов мотор-колес карьерных самосвалов БЕЛАЗ / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов, Л.И. Трухнов // Горный журнал. – 2014. №9. – С. 128-132.

3. Ishmetyev E.N. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience / E.N. Ishmetyev, O.S. Logunova, A.N. Panov, D.V. Cistyakov, E.E. Bodrov // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2017. –vol.4, is. 1. – P. 3-15.

4. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб: Севзапучцентр, 2013. – 158 с.

5. Paul D. Samuel. Conroy and Darryll J. Pines. Planetary Transmission Diagnostics / Paul D. Samuel, Joseph K. // Glenn Research Center, NASA/CR– 2004-213068 82, –2004, 83 p.

6. Xu Changa. One-dimensional fully decoupled networks for fault diagnosis of planetary gearboxes / Xu Changa, Baoping Tanga, Qian Tana, Lei Denga, Fanghong Zhangb // Mechanical Systems and Signal Processing, –2020, –vol. 141, –P. 106482.

7. Jun Yua. Planetary gearbox fault diagnosis based on data-driven valued characteristic multigranulation model with incomplete diagnostic information / Jun Yua, Yongjun Heb // Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 429, –P. 63-77.

8. Ишметьев Е.Н. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, М. Врabel // Электротехнические системы и комплексы. –2019. – № 1(42). – С. 67-73.

9. Wang Zirui. An intelligent diagnosis scheme based on generative adversarial learning deep neural networks and its application to planetary gearbox fault pattern recognition / Wang Zirui, Wang Jun, Wang Youren // Neurocomputing, 2018, vol. 310, pp 213-222.

10. Yan Han. An enhanced convolutional neural network with enlarged receptive fields for fault diagnosis of planetary gearboxes / Yan Han, Baoping Tang, Lei Deng // Computers in Industry, – 2019, – vol. 107, – P. 50-58.

11. Ишин Н.Н. Вибромониторинг остаточного ресурса зубчатых передач / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скоро-

ходов // Вестник БрГТУ. Машиностроение. – 2008. – №4(52). – С. 52-58.

12. Мачулов В.Н. Современные системы технического обслуживания и ремонта оборудования в мировой горнодобывающей отрасли // Горная промышленность. – 2013. – № 4(110). – С. 77-80.

13. Власов Ю.А. Организация системы диагностирования карьерных самосвалов по параметрам работающего масла // Горная промышленность. – 2013. – № 4(110). – С. 91-94.

14. Сергеев В.Ю. Диагностические методы и средства контроля для технического аудита узлов и агрегатов карьерных самосвалов // Горная промышленность. – 2009. – №6(88). – С. 45-47.

15. Островский М.С. Технология вибромониторинга технического состояния горных машин на этапе эксплуатации / М.С. Островский, Я.М. Радкевич, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 10. – С. 2-8.

16. Трубецкой К.Н. Современные системы управления горно-транспортными комплексами / К.Н. Трубецкой [и

др.]; под ред. К.Н. Трубецкого. – СПб.: Наука, – 2007. – 306 с.

17. Ишин Н.Н. Основные направления развития и диагностирования трансмиссионных узлов машин / Н.Н. Ишин, В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 2 (27). С. 12-22.

18. Ишин Н.Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач. – Минск: Беларус. навука, – 2013. – 432 с.

19. Карьерные самосвалы серии БелАЗ-7530. Руководство по эксплуатации. 75306-3902015 РЭ. ОАО «БелАЗ». 2017. 229 с.

20. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. / А.В. Барков, Н.А. Баркова – СПб.: СПбГМТУ, – 2004. – 156 с.

21. Неразрушающий контроль: справочник в 7-ми томах / Под ред. В.В. Клюева, – том 7, книга 2. – М.: Машиностроение, – 2005. – 829 с.

22. ГОСТ ИСО ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. – М.: Издательство стандартов, – 1998. – 22 с.

## PREPARATION OF A TRAINING DATASET FOR PERFORMING PREDICTIVE ANALYSIS OF THE BELAZ WHEEL MOTOR PLANETARY GEARBOX MALFUNCTIONS BASED ON NEURAL NETWORKS

**E.E. Bodrov, N.I. Kirtyanov**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The work shows the relevance of the problem of diagnosing the technical state and predicting the residual resource of the wheel motor planetary gearbox on BelAZ dump truck, determined by the fact that due to the peculiarities of mining equipment operation and large variable loads on the gearbox, it can fail at any time, due to the fact that its uptime is a random variable. The solution to this problem can be the use of a neural network for diagnostics, trained on an array of diagnostic data for the past and current periods of dump truck operation. In this regard, the purpose of this work was to determine significant and reliable diagnostic data that can be used for further predictive analysis and forecasting the moment of gearbox failure. In the course of the work, a sufficient number of diagnostic parameters were identified, obtained as a result of frequency analysis of the vibration signal from two accelerometers, one installed on each of the gear boxes, and the threshold values of vibration amplitudes for all the parameters were determined. A system based on neural networks, using the data set proposed in the work, will make it possible to carry out an indiscriminate assessment of the wheel motor gearbox technical condition and forecast its residual resource. This system will provide timely warning about the pre-emergency condition of the gearbox to exclude situations associated with an emergency failure of a dump truck when working in a quarry. The use of the system will provide an increase in the service life of dump trucks, a decrease in machine downtime, and a reduction in maintenance and repair costs.

**Keywords:** BelAZ, dump truck, planetary gearbox, vibration diagnostics, predictive analysis, prediction of residual resource, neural networks, data.

### REFERENCES

1. Horeshok A.A., Kudrevatyh A.V. The method of complex diagnostics of gearboxes of motor-wheels of mining dump trucks in the conditions of the enterprises of OJSC UK Kuzbassrazrezugol [Metod kompleksnogo diagnostirovaniya reduktorov motor-koles kar'ernyh avtosamosvalov v usloviyah predpriyatij OAO UK Kuzbassrazrezugol'], *Gornaja promyshlennost' [Mining]*, 2010, no. 5(93), pp. 60-64. (in Russian)

2. Ishin N.N., Goman A.M., Skorohodov A.S., Truhnov L.I. Assessment of vibration level and residual life of gear-

boxes of motor-wheels of BELAZ mining dump trucks [Ocenka urovnja vibracij i ostatochnogo resursa reduktorov motor-koles kar'ernyh samosvalov BELAZ], *Gornyj zhurnal [Mining magazine]*, 2014, no. 9, pp. 128-132. (in Russian)

3. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, – 2017, – vol.4, no. 1, – P. 3-15.

4. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovcev A.Ju. *Monitoring i diagnostika rotornyh mashin po vibracii* [Vibration monitoring and diagnostics of rotary machines], St. Petersburg, Sevzapuchsentr Publ., 2013, 158 p. (in Russian)
5. Paul D. Samuel. Conroy and Darryll J. Pines. Planetary Transmission Diagnostics / Paul D. Samuel, Joseph K. // Glenn Research Center, NASA/CR– 2004-213068 82, –2004, 83 p.
6. Xu Changa. One-dimensional fully decoupled networks for fault diagnosis of planetary gearboxes / Xu Changa, Baoping Tanga, Qian Tana, Lei Denga, Fanghong Zhangb // Mechanical Systems and Signal Processing, –2020, –vol. 141, –P. 106482.
7. Jun Yua. Planetary gearbox fault diagnosis based on data-driven valued characteristic multigranulation model with incomplete diagnostic information / Jun Yua, Yongjun Heb // Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 429, –P. 63-77.
8. Ishmet'ev E.N., Chistjakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration protection, control and analysis systems for industrial application [Sistemy vibrozashhity, vibrokontrolja i vibrodiagnostiki promyshlennogo oborudovaniya], *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2019, no. 1(42), pp. 67-73. (In Russian)
9. Wang Zirui. An intelligent diagnosis scheme based on generative adversarial learning deep neural networks and its application to planetary gearbox fault pattern recognition / Wang Zirui, Wang Jun, Wang Youren // Neurocomputing, 2018, vol. 310, pp 213-222.
10. Yan Han. An enhanced convolutional neural network with enlarged receptive fields for fault diagnosis of planetary gearboxes / Yan Han, Baoping Tang, Lei Deng // Computers in Industry, – 2019, – vol. 107, – P. 50-58.
11. Ishin N.N., Goman A.M., Skorohodov A.S. Vibration monitoring of residual life of gears [Vibromonitoring ostatochnogo resursa zubchatyh peredach], *Vestnik BrGTU. Mashinostroenie* [Bulletin of BrSTU. Mechanical engineering], 2008, no. 4(52), pp. 52-58. (In Russian)
12. Machulov V.N. Modern systems of maintenance and repair of equipment in the global mining industry [Sovremennye sistemy tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya v mirovoj gornodobyvajushhej otrasli], *Gornaja promyshlennost' [Mining]*, 2013, no. 4(110), pp. 77-80. (In Russian)
13. Vlasov Ju.A. Organization of a system for diagnosing mining dump trucks based on operating oil parameters [Organizacija sistemy diagnostirovaniya kar'ernyh samosvalov po parametram rabotajushhego masla], *Gornaja promyshlennost' [Mining]*, 2013, no. 4(110), pp. 91-94. (In Russian)
14. Sergeev V.Ju. Diagnostic methods and means of control for technical audit of components and assemblies of mining dump trucks [Diagnosticheskie metody i sredstva kontrolja dlja tehničeskogo audita uzlov i agregatov kar'ernyh samosvalov], *Gornaja promyshlennost' [Mining]*, 2009, no. 6(88), pp. 45-47. (In Russian)
15. Ostrovskij M.S., Radkevich Ja.M., Bojko P.F. Technology for vibration monitoring of the technical condition of mining machines at the stage of operation [Tehnologija vibromonitoringa tehničeskogo sostojaniya gornyh mashin na jetape jekspluatacii], *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika [Mining equipment and electromechanics]*, 2008, no. 10, pp. 2-8. (In Russian)
16. Trubeckoj K.N. *Sovremennye sistemy upravlenija gorno-transportnymi kompleksami* [Modern control systems for mining and transport complexes]. St. Petersburg, The science Publ., 2007, 306 p. (In Russian)
17. Ishin N.N., Al'gin V.B. The main directions of development and diagnostics of transmission units of machines [Osnovnye napravlenija razvitija i diagnostirovaniya transmisionnyh uzlov mashin], *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov [Mechanics of machines, mechanisms and materials]*, 2014, no. 2(27), pp. 12-22. (In Russian)
18. Ishin N.N. *Dinamika i vibromonitoring zubchatyh peredach* [Dynamics and vibration monitoring of gears]. Minsk: Belarus. Navuka Publ., 2013. 432 p. (In Russian)
19. Mining dump trucks of the BelAZ-7530 series. Manual. 75306-3902015 RE. JSC "BelAZ". 2017. 229 p. (In Russian)
20. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, SPbGMTU, 2004. 156 p. (In Russian)
21. Kljuev V.V. *Nerazrushajushhij kontrol'* [Non-destructive testing]. vol. 7, book 2. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
22. GOST R 10816-1-97, Vibration. Machine condition monitoring based on vibration measurements on non-rotating parts. Moscow, Publishing house of standards Publ., 1998. 22 p. (In Russian)

Бодров, Е.Э. Подготовка обучающего набора данных для выполнения предиктивного анализа неисправностей планетарного редуктора мотор-колеса БелАЗа на основе нейронных сетей / Е.Э. Бодров, Н.И. Киртянов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.4-10.

Bodrov E.E., Kirtyanov N.I. Preparation of a training dataset for performing predictive analysis of the BelAZ wheel motor planetary gearbox malfunctions based on neural networks. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.4-10. (In Russian).

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОТЛОАГРЕГАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.В. Варганова, Д.А. Петров, Д.О. Позин

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

aleksandra-khlamova@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрен подход по автоматизации процесса расчета технико-экономических моделей котлоагрегатов промышленных тепловых электростанций, с целью адаптации их к условиям программно-вычислительного комплекса КАТРАН. Основными исходными данными для расчета являются режимные карты котлов и стоимостные показатели энергоресурсов. Модуль позволяет преобразовать режимную карту в необходимый вид нужный для определения оптимальной загрузки котлоагрегатов с использованием метода динамического программирования в ПК КАТРАН. Процесс преобразования режимной карты автоматизирован с целью ускорения расчетов оптимальных режимов работы промышленных энергетических котлов и поиска наилучшего состава топливной смеси. При расчетах учтены эксплуатационные характеристики энергетических котлов и их ограничения режимов по температуре перегретого пара, питательной воды и давления пара в барабане. Разработанный подход применим для решения задачи внутростанционной оптимизации в ПК КАТРАН.

**Ключевые слова:** электростанция, энергетический котел, технико-экономическая модель, оптимизация, динамическое программирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия в условиях рыночной экономики сокращают затраты на производство готовой продукции и одним из решений данной задачи, является сокращение доли энергозатрат.

Повышение эффективности функционирования промышленных систем электроснабжения достигается за счет внедрения различных мероприятий. Так в [1] приведен подход, позволяющий сокращать потери мощности в распределительных сетях за счет введения реактивных статических компенсаторов.

Помимо технических решений существуют подходы, связанные с управлением режимами объектов электросетевого хозяйства предприятия с использованием специализированного программного обеспечения, позволяющего на основе известных методов математической оптимизации решать задачи:

- оптимизировать режим по реактивной мощности [2];
- распределять нагрузки между источниками энергии в целом по энергоузлу [3] и между отдельными агрегатами электростанции [4], учитывая при этом особенности их технологических режимов работы [5].

Авторами [6] приводится подход, позволяющий осуществлять внутростанционную оптимизацию режимов заводских ТЭЦ с использованием метода динамического программирования, определяя при этом поиск экономически целесообразные загрузки котлов.

Данная работа посвящена разработке подхода по автоматизированному построению технико-экономических моделей котлоагрегатов промышленных тепловых электростанций с использованием оригинального программного продукта КАТРАН.

Разработанный подход позволяет определять эффективное распределение тепловой нагрузки между котлами промышленной тепловой электростанции по критерию минимума затрат на свежий пар [7].

### РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для определения оптимальной загрузки котлоагрегатов с использованием метода динамического программирования [7-8] необходимо осуществить разработку технико-экономических моделей котлоагрегатов [9], которые представляют собой зависимость паропроизводительности котла от расхода энергоносителя и себестоимости пара. Данные модели удобнее для расчетов представлять в табличной форме (табл. 1). Кроме того, модели реализованы в программном коде (рис. 1) в оригинальном программном продукте КАТРАН [10].

Паропроизводительность  $D$  и расход энергоносителей  $B$  определяются исходя из режимных карт котлов.

Таблица 1

Общий вид технико-экономической модели котла

$D_i, \text{т/ч}$	$D_{i1}$	$D_{i2}$	$D_{i3}$	...	$D_{ij}$
$B_i, \text{м}^3/\text{ч}$	$B_{i1}$	$B_{i2}$	$B_{i3}$	...	$B_{ij}$
$B_{i+1}, \text{м}^3/\text{ч}$	$B_{(i+1)1}$	$B_{(i+1)2}$	$B_{(i+1)3}$	...	$B_{(i+1)j}$
...	..	...	...	...	...
$B_{i+n}, \text{м}^3/\text{ч}$	$B_{(i+n)1}$	$B_{(i+n)2}$	$B_{(i+n)3}$	...	$B_{(i+n)j}$
$S_i, \text{руб./т}$	$S_{i1}$	$S_{i2}$	$S_{i3}$	...	$S_{ij}$

Указанную модель применять при определении оптимальных нагрузок котлоагрегатов невозможно, т.к. важным является точное определение нагрузок котлов, а в режимной карте отображены допустимые интервалы,

например:  $D_{i1}=100$  т/ч, а  $D_{i2}=150$  т/ч.

Тогда применение метода динамического программирования будет необоснованным [7].

Авторами предлагается преобразовывать данную модель к виду, в котором шаг паропроизводительности равен 1 т/ч, что обеспечит поиск оптимального решения загрузки котлоагрегата.

В этом случае если шаг между двумя соседними паропроизводительностями не равен 1 т/ч, то необходимо осуществить пересчет расхода соответствующего энергоносителя и себестоимости пара для текущего значения паропроизводительности  $D=(D_i+1)$ :

$$B=(D - D_i)/(D_{i+1} - D_i) \cdot (B_{i+1} - B_i) + B_i, \quad (1)$$

$$S=(D - D_i)/(D_{i+1} - D_i) \cdot (S_{i+1} - S_i) + S_i, \quad (2)$$

где  $B, S$  – искомое значение расхода энергоносителя и себестоимости свежего пара соответственно для паропроизводительности  $D$ ;

$D_i, D_{i+1} (B_i, B_{i+1}; S_i, S_{i+1})$  – текущее и следующее значение паропроизводительности котла (расхода энергоносителя и себестоимости пара) в соответствии с исходной режимной картой.

Пересчитанная модель позволяет осуществить определение оптимальной загрузки котлоагрегатов промышленных электростанций с точностью до 1 т/ч, что является применим для решения эксплуатационных задач в условиях реальных промышленных электростанций.

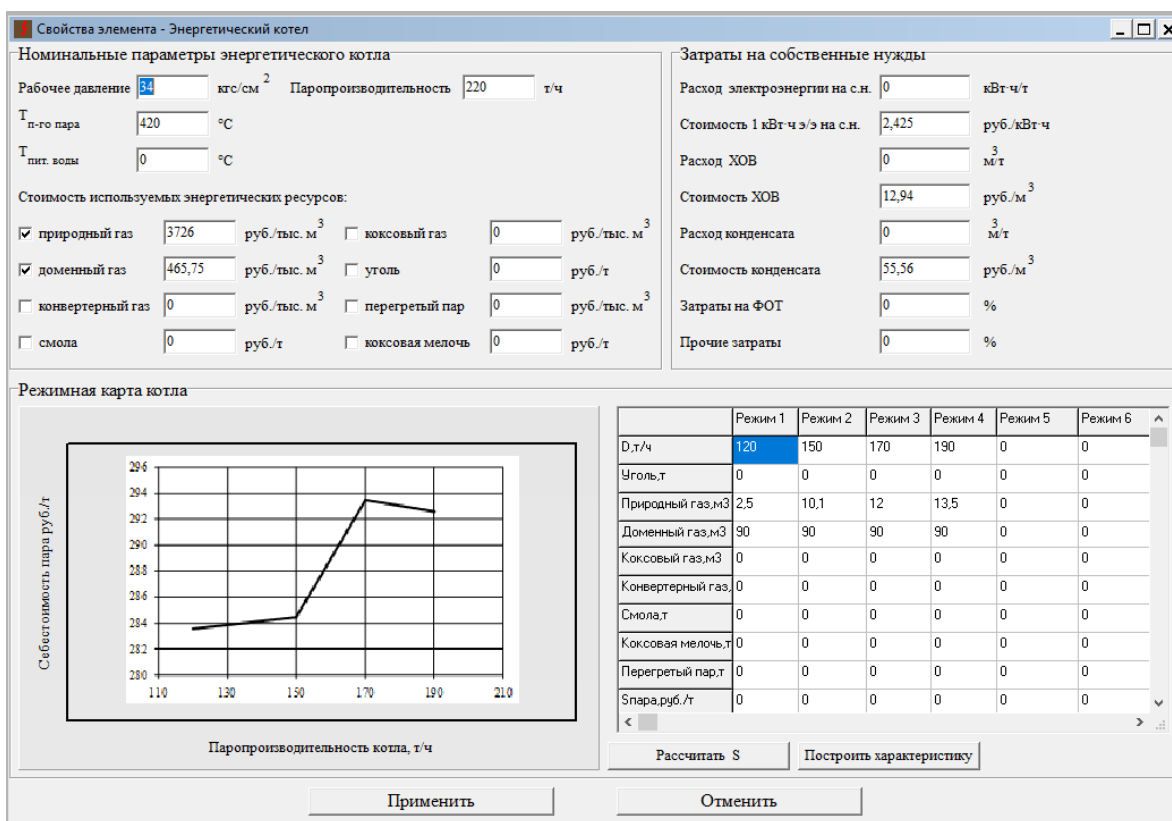


Рис. 1. Окно ввода режимной карты котлоагрегата

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход, позволяет на основании режимных карт котлов, которые отображают эксплуатационные ограничения оборудования, построить технико-экономические модели агрегатов с целью определения оптимальной загрузки котлов. Результаты работы могут быть использованы в диспетчерских службах энергохозяйства предприятия или в технических отделах электростанций. Подход предназначен для планирования режимов работы энергетического оборудования промышленных электростанций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. T. R. Khrumshin, G. P. Kornilov, A. A. Murzikov, A. S. Karandaev and V. R. Khrumshin, "Mathematical model of the static reactive power compensator," 2014 *International*

*Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, Saratov, 2014, pp. 418-425.

2. D. Yang, "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.

3. Щапин Н.М., Юстус В.П. Оптимизация распределения паровых нагрузок между котельной завода и ТЭЦ энергосистемы // *Промышленная теплоэнергетика*. 1977. №54. С. 43-44.

4. Аминов Р.З., Доронин М.С., Лубков В.И., Голина Р.М. Оперативное распределение нагрузок между котлоагрегатами ТЭЦ с учетом их эксплуатационного состояния // *Электрические станции*. 1982. №9. С. 34-35.

5. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Требования к виртуальным моделям тепловых электростанций и инструментам их создания // *Электрические станции*. 2014. № 1 (990). С. 2-8.

6. A.V. Varganova, A.V. Malafeev, "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52. vol. 1. pp. 74-78.

7. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // *Промышленная энергетика*. 2018. № 1. С. 17-22.

8. A. V. Varganova, M. M. Lygin and V. R. Khramshin, "Fuel Mix Optimization of Utility Boilers of Industrial Power Stations," *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, Russia, 2018, pp. 1-4.

9. Кочкина А.В., Малафеев А.В., Курилова Н.А., Нетупский Р.П. Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий // *Электротехнические системы и комплексы*. 2013. № 21. С. 247-252.

10. А.с. 2019618397 Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опублик. 01.07.19

## AUTOMATED CONSTRUCTION OF TECHNICAL AND ECONOMIC MODELS OF BOILER UNITS OF INDUSTRIAL POWER PLANTS

A.V. Varganova, D.A. Petrov, D.O. Pozin

Nosov Magnitogorsk State Technical University

**Abstract.** The paper considers an approach to automate the process of calculating technical and economic models of boiler units of industrial thermal power plants, in order to adapt them to the conditions of the KATRAN software and computing complex. The main initial data for the calculation are operating maps of boilers and cost indicators of energy resources. The module allows you to transform the operating map into the required form required to determine the optimal loading of boiler units using the dynamic programming method in the KATRAN. The process of converting the regime map is automated in order to accelerate the calculation of the optimal operating modes of industrial power boilers and to search for the best composition of the fuel mixture. The calculations took into account the operational characteristics of power boilers and their mode limitations in terms of temperature of superheated steam, feed water and steam pressure in the drum. The developed approach is applicable to solving the intrastation optimization problem in the KATRAN software package.

**Keywords:** power plant, power boiler, technical and economic model, optimization, dynamic programming.

### REFERENCES

1. T. R. Khramshin, G. P. Kornilov, A. A. Murzikov, A. S. Karandaev and V. R. Khramshin, "Mathematical model of the static reactive power compensator," *2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, Saratov, 2014, pp. 418-425.

2. D. Yang, "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.

3. Shhapin N.M., Justus V.P. [Optimal Heat Load Distribution Between Plant Boilers and Power System TPP] *Промышленная теплотехника* [Industrial Power Engineering], 1977, no. 54, pp. 43-44. (In Russian)

4. Aminov R.Z., Doronin M.S., Lubkov V.I., Golina R.M. On Line Load Distribution Between Boilers of TPP Taking Into Account Theirs State of Repair. *Elektricheskie stancii* [Power Technology and Engineering], 1982, no. 9, pp. 34-35. (In Russian)

5. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Requirements for virtual models of thermal power plants and tools for their creation. *Elektricheskie stancii* [Power Technology and Engineering], 2014, no 1 (990), pp. 2-8. (In Russian)

6. A.V. Varganova, A.V. Malafeev, "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52. vol. 1. pp. 74-78.

7. Varganova A.V. Algorithm for in-plant optimization of operating modes of boiler units and turbine generators of industrial power plants. *Промышленная энергетика* [Industrial energy], 2018, no 1, pp. 17-22. (In Russian)

8. A. V. Varganova, M. M. Lygin and V. R. Khramshin, "Fuel Mix Optimization of Utility Boilers of Industrial Power Stations," *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, Russia, 2018, pp. 1-4.

9. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupsky R.P. Construction of the Technical and Economic Models of Auxiliary Turbine Generators and Boilers of a Power Plant. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 247-252. (In Russian)

10. Varganova A.V., Malafeev A.V. *KATRAN-OptActivePower* [KATRAN-OptActivePower]. Software RF, no. 2019618397, 2019.

Варганова, А.В. Автоматизированное построение технико-экономических моделей котлоагрегатов промышленных электростанций / А.В. Варганова, Д.А. Петров, Д.О. Позин // *Автоматизированные технологии и производства*. 2020. №2(22). С.11-13.

Varganova A.V., Petrov D.A., Pozin D.O. Automated construction of technical and economic models of boiler units of industrial power plants. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.11-13. (In Russian).

УДК 681.5.011

## СПЕЦИФИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Ю.А. Попова<sup>1</sup>, М.Д. Терех

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>porova.ya@bk.ru

**Аннотация.** Оптимизация повседневных процессов при помощи компьютеризированных систем является одной из важнейших задач сферы современных информационных технологий. Передача простых задач компьютерам коснулась, в том числе, и сферы жилищно-коммунального хозяйства. Появление автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) заинтересовало не только жителей домов, но и застройщиков и управляющие компании, так как наличие возможности удаленной передачи данных с приборов учета увеличивает спрос на такие квартиры и помогает оптимизировать расход ресурсов. На сегодняшний день существует очень мало учебных пособий, которые помогли бы начинающему специалисту ознакомиться с системой. В данной статье рассмотрены основные вопросы проектирования автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов с учетом современных требований и предлагаемых решений. Выбор системы зависит от различных факторов (местоположение объекта, возможности прокладки коммуникаций, финансово-экономической составляющей и др.) и на этапе проектирования необходимо выбрать оптимальный вариант для решения конкретной задачи. Использование проводных и беспроводных технологий дает возможность построения АСКУЭ различного исполнения, в зависимости от удобства расположения оборудования и кабельных трасс. Возможность комбинировать различные способы передачи данных позволяет сделать систему гибкой и индивидуальной для каждого дома. Сбор показаний с приборов учёта (воды, газа, тепла, электричества) помогает комплексно проанализировать расход ресурсов на рассматриваемом объекте и уменьшить затраты на энергопотребление. Растущий спрос на оснащение данной системой зданий и сооружений требует появления учебных пособий, методических указаний для проектирования и строительства АСКУЭ.

**Ключевые слова:** проектирование автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов, приборы учета ресурсов, учет энергоресурсов, управление энергоресурсами, проводная и беспроводная передача данных.

### ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом технологии совершенствуются. С появлением компьютеров и Интернета жизнь человечества сильно изменилась, большинство задач и действий стали автоматизированными. Люди стараются упростить и сделать более комфортной свою жизнь - именно поэтому появились различные устройства и сервисы, предназначенные для обеспечения удобства повседневной жизни. Автоматизированная система коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) стала широко применяться при строительстве зданий и сооружений. При проектировании необходимо постоянно анализировать рынок предлагаемых устройств, так как регулярно появляются новые компании, предлагающие свои решения для организации АСКУЭ. С опытом эксплуатации выявляются те или иные недостатки, которые оперативно решаются и внедряются производителями, делая систему более практичной, отказоустойчивой, масштабируемой и удобной в эксплуатации. Развитие рынка электроэнергии на основе экономического метода управления потребовало создания полномасштабных иерархических система: автоматизированных

систем измерения электроэнергии (АСИЭ), учета потребления и сбыта электроэнергии (АСУПСЭ), диспетчерского управления (АСДУ), контроля и учета энергопотребления (АСКУЭ).[1] Данные системы показали свою эффективность, и Минэнерго России разработал закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации», который был подписан президентом. Многоквартирные дома, вводимые в эксплуатацию после 1 января 2021 года, должны быть оснащены интеллектуальными приборами учета электроэнергии. Таким образом, существует перспектива разработки и принятия подобных законопроектов для других энергоресурсов.

### СПЕЦИФИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

АСКУЭ - это система технических и программных средств для автоматизированного дистанционного измерения, сбора, передачи, хранения, накопления, обработки, анализа, отображения, документирования и распространения результатов потребления энергоресурсов [2].

Основным назначением системы является автоматизированный сбор показаний учета и передача их в управляющие и энергосбытовые компании.

АСКУЭ помогает решить ряд проблем существующей системы сбора показаний приборов учета, такие как:

1) Экономия времени потребителя. Нет необходимости заниматься передачей показаний приборов учета и следить за сроками сдачи, система делает это автоматически в назначенное время или по запросу управляющей или энергосбытовой компании;

2) Экономия времени при выставлении счетов. Показания передаются в срок и не нужно выполнять перерасчет в случае задержки показаний. Программное обеспечение (ПО) системы автоматически внесет показания в счет каждой квартиры.

3) Корректность данных. Отсутствует вероятность искажения показаний счетчиков (в результате самопроизвольных ошибок или преднамеренных действий). Данная проблема обуславливается человеческим фактором – ошибки в показаниях могут делать, как и сами потребители, так и проверяющие во время массовых обходов;

4) Сокращение затрат на обслуживание системы. На данный момент существует ряд проверяющих, которым необходимо попадать в квартиры, к местам установки индивидуальных приборов учета (ИПУ) для сверки показаний, что не так просто сделать ведь не всегда потребители находятся дома во время обходов. Прибор автоматически передаст данные, так же может сообщить о неполадках, на решение которых придет квалифицированный специалист.

На данный момент существуют различные технологии передачи данных. Для проводной передачи данных используются следующие стандарты интерфейсов: RS485, RS232, CAN, Meter-Bus (M-Bus), ДПЛС, Ethernet/Internet [3]. Для беспроводной передачи данных используются следующие стандарты интерфейсов: GSM/GPRS (NB-IoT), радиоканал (LoRaWAN и др.), Internet (Wi-Fi).

Проводная система передачи данных удобна для проектирования и монтажа на стадии строительства здания. Присутствует возможность предусмотреть кабеленесущие конструкции, место для установки оборудования, возможность провести отделочные работы для скрытия мест прокладки кабелей. Витая пара - это лучшее решение для прокладки сети, поскольку она имеет наименьшее паразитное излучение от сигнала. [4]

Беспроводная передача данных удобна для установки автоматизированной системы передачи данных в уже заселенных домах, так как не нужно проводить монтажные работы по прокладке кабелей, достаточно установить соответствующее оборудование (устройство сбора и передачи данных) или специализированные счетчики. Для передачи данных по сети стандарта LoRaWAN необходимо установить базовую станцию, которая посредством широкополосного радиосигнала собирает данные с беспроводных счетчиков в радиусе 2 км в условиях городской застройки. Данное решение также может подойти для строящихся жилых комплексов, состоящих из нескольких зданий.

На рынке все больше компаний предлагают свои решения для организации АСКУЭ, что ведет к конкуренции и удешевлению системы для потребителей. Производители предлагают как индивидуальные решения, так и комплексные решения для всего здания, комплексов зданий. Наличие данной системы привлекает покупателей своей новизной и удобством в эксплуатации.

Основные технические требования к автоматизированной системе коммерческого учета потребления энергоре-

сурсов представлены в СП 31-110- 2003 Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий и СП 256.1325800.2016 Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа (с Изменениями N 1, 2, 3).

К АСКУЭ предъявляются следующие требования:

1) Высокая надежность функционирования, точность измерений и безошибочная передача данных;

2) Иметь защиту от несанкционированного изменения параметров;

3) Масштабируемость, добавление к существующей системе новых абонентов и/или приборов;

4) Совместимость оборудования. Возможность использования оконечного оборудования (счетчиков) различных производителей;

5) Возможность автоматической работы, опрос приборов учета производится автоматически;

6) Возможность хранения и анализа данных, выгрузка их в различные СУБД (системы управления базами данных), электронные таблицы;

7) Возможность передачи показаний в соответствующие энергосбытовые компании.



Рис. 1. Принципиальная схема передачи показаний приборов учета.

Счетчик является оконечным устройством, который производит учет потребленных энергоресурсов. Для организации передачи данных счетчик должен быть импульсным или цифровым. В зависимости от производителя и выбранной технологии передачи данных, информация передается на устройство сбора и передачи данных (УСПД). Далее передача данных по запросу на верхний уровень (в центральное УСПД при его наличии или непосредственно в центр сбора и обработки данных системы), в центр сбора и обработки данных АСКУЭ [5].

Таким образом, простейшая схема организации АСКУЭ состоит из 3 уровней:

Уровень первый – уровень сбора информации.

Элементами данного уровня являются цифровые или импульсные счетчики (воды, тепла, электроэнергии и газа) и датчики (затопления, протечки и др.). Данные о потребляемых энергоресурсах должны быть получены с помощью приборов, обеспечивающих измерение с требуемыми метрологическими и эксплуатационными характеристиками. [5]. Для соединения счетчиков и УСПД может использоваться интерфейс RS-485, двухпроводная линия связи (ДПЛС), радио- и GSM-каналы. При проектировании, необходимо учитывать какие ограничения имеет оборудование, как по протяженности линии (удаленность устройств), так и по количеству подключаемых устройств. В большинстве случаев счетчики могут быть от любого производителя, независимо от производителя основного комплекта оборудования. Каждый счетчик, входящий в систему имеет персональный сетевой адрес. [6]. Присвоение адреса осуществляется либо на стадии пусконаладочных работ, либо на заводе-изготовителе.

Уровень второй – связующий уровень.



На этом уровне находятся различные преобразователи, контроллеры и УСПД. Преобразователи необходимы для изменения одного интерфейса в другой (например, RS-485 в Ethernet) для передачи данных на компьютер/сервер. Контроллер по двухпроводной линии может собирать информацию напрямую со счетчиков или через адресный счетчик. УСПД, в зависимости от производителя, могут осуществлять сбор информации от различных приборов учета, например показания воды и газа. Данное устройство имеет несколько входов с интерфейсом RS-485. УСПД предназначено не только для сбора данных со счетчиков, но и самостоятельной их обработки и передачи на верхний уровень и используется в более сложных системах. Например, если ставится задача получать данные со счетчиков не раз в сутки, а каждые 3 минуты для наблюдения за графиком нагрузки. [7]

Уровень третий – уровень хранения и анализа данных.

Элементом данного уровня является компьютер или сервер с программным обеспечением (ПО), которое отличается в зависимости от количества подключаемого оборудования. Соответственно, стоимость системы для небольшого дома будет меньше, чем для многоквартирного. Программное обеспечение позволяет вести учет в автоматическом режиме по заданному протоколу периода опроса либо по запросу оператора. [8]. Дополнительно ряд производителей предусмотрели многопользовательский WEB-интерфейс для потребителей и удаленные рабочие места для управляющей компании и энергосбытовой компании. Потребители имеют доступ к информации по потреблению энергоресурсов, возможность оплаты услуг и проводить анализ данных.

Стоимость системы учета во многом зависит от количества и типа приборов, входящих в сеть, и метода установки. Как показывает практика, за счет автоматизации процессов и исключения потерь энергоресурсов система окупается достаточно быстро. [9]

Для решения задач по экономии энергоресурсов одним из эффективных путей является внедрение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Переход экономики на рыночные методы хозяйствования предъявляет жесткие требования к достоверности и оперативности учета. Эти требования могут быть удовлетворены только путем создания АСКУЭ, оснащенной современной вычислительной техникой. [10]

Таким образом, проектирование АСКУЭ необходимо начать с анализа объекта:

- 1) Возможность прокладки кабельных линий;
- 2) Возможность передачи данных по беспроводным каналам связи, наличие базовой станции рядом, установка новой или аренда;
- 3) Типы счетчиков (вода, газ, тепло, электричество);
- 4) Наличие необходимых интерфейсов передачи данных у оборудования;
- 5) Количество устанавливаемого оборудования;
- 6) Определиться с местоположением центрального оборудования, сбор показаний будет осуществляться с одного дома или комплексов зданий;
- 7) Частота опроса счетчиков;
- 8) Наличие желаемого WEB-интерфейса, приложения для смартфона или видеодомофона.

После получения ответов на эти вопросы, можно приступать к выбору оборудования и проектированию системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии и широкий ассортимент решений от различных производителей позволяют адаптировать АСКУЭ под нужды заказчика в зависимости от потребностей и поставленных задач. Возможность комбинирования различных способов передачи данных и совместимость оборудования разных производителей делает систему универсальной для всех типов зданий и комплексов, а использование стандартных интерфейсов помогает создавать легко масштабируемые системы. Универсальность и удобство пользования для конечных потребителей и поставщиков услуг совместно с невысокой стоимостью системы делает массовое внедрение АСКУЭ актуальным и востребованным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов С.В. Система АСКУЭ / С.В. Ершов, Е.М. Фролков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012 г. – Вып. 12, Ч. 3 – С. 31-37
2. Гуртовцев А.Л.//Избранные работы по АСКУЭ (1981-2009). – 2018 г. – 606 с.
3. Официальный сайт производителя оборудования для АСКУЭ. <https://resurs.bolid.ru/index.php>
4. Пью Хылам Хтут Интегрированная система управления учетом и контролем энергоресурсов: дис. канд. техн. наук. – Москва, 2018. – 174 с.
5. Свод правил: СП 31-110-2003. 2004 г. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий. - Москва: Стандартинформ. - 50 с.
6. Широков А.А. Автоматизация энергоучета жилищно-коммунального хозяйства / А.А. Широков, А.В. Кычкин, А.А. Клюкин//Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014 г. - №12 – С. 78-88
7. Максимова А.М. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии на современном рынке электроэнергии / А.М. Максимова, Д.К. Емельянова//Молодой учёный. – 2016 г. – №21(125) – С. 177-178
8. Разумов А.С. Автоматизированные системы коммерческого учета энергоресурсов в сфере ЖКХ / А.С. Разумов, И.Р. Смирнова// Информатизация и системы управления промышленности – 2011 г. - №2(32) – С. 6-8
9. ООО НПП «Теплодохран» АСКУЭ «Пульсар»// Информатизация и системы управления промышленности – 2019 г. - №2(80) – С. 11-13
10. Гбилимо, Уо Уо Повышение производительности и оптимизация структуры локальных сетей АСКУЭ: дис. канд. техн. наук. – Москва, 2004. – 144 с.

---

# SPECIFICITY OF DESIGNING AN AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING AND ACCOUNTING OF ENERGY RESOURCES

Y.A.Popova, M.D.Terekh

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

popova.ya@bk.ru

**Abstract.** Optimization of daily processes using computerized systems is one of the most important tasks in the field of modern information technology. The transfer of simple tasks to computers affected, among other things, the sphere of housing and communal services. The emergence of an automated system for commercial metering of energy resources interested not only residents of houses, but also developers and management companies, since the availability of the possibility of remote data transmission from metering devices increases the demand for such apartments and helps to optimize resource consumption. To date, there are very few tutorials that would help a beginner get acquainted with the system. This article discusses the main issues of designing an automated system for commercial metering of energy resources, taking into account modern requirements and proposed solutions. The choice of the system depends on various factors (the location of the object, the possibility of laying communications, the financial and economic component, etc.) and at the design stage it is necessary to choose the best option for solving a specific problem. The use of wired and wireless technologies makes it possible to build an automated metering system of various designs, depending on the convenience of the location of equipment and cable routes. The ability to combine different methods of data transmission allows you to make the system flexible and individual for each home. Collecting readings from metering devices (water, gas, heat, electricity) helps to comprehensively analyze the consumption of resources at the facility in question and reduce energy costs. The growing demand for equipping buildings and structures with this system requires the appearance of teaching aids, guidelines for the design and construction of an automated system for commercial metering of energy resources.

**Keywords:** design of an automated system for commercial metering of energy resources, resource metering devices, energy metering, energy management, wired and wireless data transmission.

## REFERENCES

1. Ershov S.V., E.M. Frolkov System of ASKUE [Sistema ASKUE], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [News of the Tula State University. Technical science]*, 2012, no.12 (3), pp. 31-37
2. Gutrovtsev A.L., Selected works on ASKUE (1981-2009) [Izbrannyye raboty po ASKUE (1981-2009)], 2018, pp. 606.
3. Official site of an equipment developer. <https://resurs.bolid.ru/index.php>
4. P`o Khyllam Khtut. Integrated management system for accounting and control of energy resources [Integriruvannaya sistema upravleniya uchedom I kontrolev energoresursov], dissertatsiya [thesis], 2018, pp. 174.
5. Set of rules, no. 31-110-2003, year 2004, Design and installation of electrical installations for residential and public buildings, pp. 50 [Svod pravil SP 31-110-2003, 2004, Proektirovaniye I montazh elektroustanovok zhilikh I obshchestvennykh zdaniy I ssuzheniy], str. 50.
6. Shirokov A.A., Kychkin A.V., Klyukin A.A. Automation of energy metering for housing and communal services [Avtomatizatsiya energoucheta zhilishchno-kommunalnogo khozyaistva], *Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Electrical engineering, information technology, control systems], 2014, no. 12, pp. 78-88.
7. Maksimova A.M., Emelyanova D.K., Automated system for commercial metering of electricity in the modern electricity market [Avtomatizirovannaya sistema kommercheskogo ucheta elektroenergii na sovremennom rynke elektroenergii], *Molodoy ucheniy* [Young scientist], 2016, no. 21(125), pp. 177-178.
8. Razumov A.S., Smirnova I.R., Automated systems for commercial metering of energy resources in the housing sector [Avtomatizirovannyye sistemy kommercheskogo ucheta energoresursov v sfere ZHKKH], *Informatizatsiya I sistemy upravleniya promyshlennosti* [Informatization and systems management of industry], 2011, no. 2(32), pp. 6-8.
9. OOO "NPP Teplovodokhran", ASKUE "Pulsar" [ASKUE "Pulsar"], *Informatizatsiya I sistemy upravleniya promyshlennosti* [Informatization and systems management of industry], 2019, no. 2(80), pp. 11-13.
10. Gbilimo Y.Y., Improving performance and optimizing the structure of local networks of ASKUE [Povysheniye proizvoditelnosti i optimizatsiya struktury lokalnykh setey ASKUE], dissertatsiya [thesis], 2004, pp. 144.

---

Попова, Ю.А. Специфика проектирования автоматизированной системы коммерческого учета энергоресурсов / Ю.А. Попова, М.Д.Терех // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.14-17.

Popova Y.A., Terekh M.D. Specificity of designing an automated system for monitoring and accounting of energy resources. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.14-17. (In Russian).

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРОГРАММ

Е.А. Дудоров<sup>1</sup>, С.М. Андреев<sup>2</sup>, К.А. Котова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника», г. Москва, Россия

<sup>2,3</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>[andreev.asc@gmail.com](mailto:andreev.asc@gmail.com), <sup>3</sup>[kotova-ks@mail.ru](mailto:kotova-ks@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены современные подходы к проектированию и изготовлению образцов и изделий с учетом назначения и сферы применения. Выявлены ключевые требования для изделий, создаваемых в рамках программ Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», а также методы проектирования и технологии изготовления. На примере космического эксперимента с участием робототехнического комплекса, созданного с применением аддитивных технологий, подтверждена возможность использования изделий аддитивного производства в условиях повышенных требований к качеству с учетом присущих условиям эксплуатации нагрузок (космических полетов и условий, их имитирующих). Рассмотрен процесс послойного наплавления в аддитивном производстве как одна из технологий, использованная для изготовления изделий космического назначения, также отмечены недостатки указанной технологии на этапах жизненного цикла изделия. В качестве альтернативы послойному наплавлению рассмотрена технология селективного лазерного спекания, сделан обзор параметров процесса управления изготовлением изделий. Представлены результаты опытного изготовления изделий с применением технологии селективного лазерного спекания, а также имевшие место дефекты изготовления. Проведен краткий анализ причин и возможностей устранения несоответствий конечных изделий САД-моделям. Параметры процесса селективного лазерного спекания классифицированы для последующего анализа их влияния, проведения расчетов и измерений. Показаны результаты оптимизации ряда параметров процесса, а также намечены последующие исследования с проведением расчетов и измерений и выработкой алгоритма управления выбранным параметром для обеспечения точности и качества конечных изделий.

**Ключевые слова:** селективное лазерное спекание, САД-модель, остаточные напряжения, проектирование и разработка, деформация, прочность..

### ВВЕДЕНИЕ

Ключевым критерием качества проектирования и исполнения высокоточных изделий для различных сфер применения является точное соответствие деталей и узлов разработанным САД-моделям, а также обеспечение прочностных характеристик материалов в зависимости от функционала и назначения в конечном изделии. При этом важную роль играет как способ проектирования изделий, так и выбранная технология исполнения из присутствующего разнообразия технологических возможностей. С повышением требований к качеству конечных изделий возрастает потребность использования прогрессивных методов проектирования и технологий исполнения изделий.

Используемые в настоящее время параметрические САД-системы дают возможность построения геометрии изделий любой сложности и точности, обеспечивая инженерам-разработчикам возможности проектирования подробных трехмерных моделей. Вместе с тем, для повышения качества проектирования к настоящему времени разработаны программные средства оптимизации, реализующие так называемое генеративное проектирование и дающие возможность работать со спектром возможных

вариантов конструкции, используя накопленные принципы и алгоритмы анализа методом конечных элементов (FEA – Finite Elements Analysis) с расчетом исходных данных по нагрузкам, массе, давлению, характеристикам материала и генерируя формы изделий при использовании стандартного набора конструкторских инструментов [1].

Другим принципиально важным подходом к проектированию является обеспечение качественных характеристик изделий с использованием нетрадиционных решений, когда геометрия конструкций генерируется с использованием бионических принципов построения, максимально приближенных и повторяющих существующие в физическом мире объекты (геометрия растений, животных, конечностей, суставов человеческого организма).

Подобный подход к проектированию, называемый «бионическим дизайном», позволяет избежать недостатков техногенных конструкций, таких как излишний расход материалов при изготовлении, в то же время обеспечивая уменьшение веса изделий при сохранении (или увеличении) исходной прочности.

Подобные решения критически важны в сферах с повышенными отраслевыми требованиями к весовым и прочностным характеристикам изделий: изделия для космической отрасли, авиастроение, инновационное машино-

строение [2]. Бионический подход в проектировании, помимо обеспечения весовых и прочностных характеристик, позволяет также оптимизировать расход материалов на изготовление за счет оптимизации конструктивных особенностей, таких, как радиусы скругления и т.д., что делает данный подход в проектировании более экономически выгодным при изготовлении изделий.

Учитывая требования к качеству деталей, узлов и конечных изделий, при проектировании также необходимо обеспечивать экономическую эффективность изготовления, что непосредственно влияет на выбор технологии изготовления изделий.

На практике полученная в результате проектирования геометрия, позволяющая выдержать ожидаемые нагрузки на различные участки, может оказаться непрактичной для изготовления в связи с большими затратами или ограничениями доступных производственных методов. Существующие технологии субтрактивного и аддитивного производства позволяют решать необходимые задачи изготовления изделий в зависимости от их назначения и получать сложные геометрические формы, которые нельзя изготовить путем механообработки. Тем не менее, даже в этом случае есть определенные правила относительно геометрии, которую возможно напечатать, обеспечивать требуемую прочность изделий.

#### ИНСТРУМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Для высокотехнологичных компаний, таких как АО «НПО «Андроида техника» становится все более важным отвечающее целям и задачам разработки сочетание инструментов проектирования и выбор технологии изготовления. При выполнении работ по проектированию, разработке и изготовлению изделий в рамках космических программ Российской Федерации, АО «НПО «Андроида техника» совершенствует все этапы жизненного цикла изделий.

Разрабатываемые в рамках космических программ различные по назначению, функционалу и конструктивным особенностям робототехнические комплексы (РТК) предназначены и используются в качестве средств роботизированной поддержки (транспортные и грузовые манипуляторы, сервисные манипуляторы технического обслуживания и ремонта), а также универсальных тренажеров (для обучения состава требуемым навыкам при эксплуатации ракетно-космической техники).

Указанные цели и задачи разработки и изготовления РТК предъявляют повышенные требования к точности, прочности и весу разрабатываемых изделий.

АО «НПО «Андроида техника» был успешно выполнен ряд работ по разработке и изготовлению РТК в рамках космических программ Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». Также продолжается разработка и проектирование универсальных систем обучения, имитации и визуализации условий работы для обучения состава требуемым навыкам при эксплуатации ракетно-космической техники.

Для подтверждения возможности применения РТК, в условиях операционной эксплуатации и воздействия факторов космического полета, вибраций и перегрузок, в 2019

году Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос» был проведен первый этап космического эксперимента «Испытатель», с антропоморфной робототехнической системой FEDOR, разработанной АО «НПО «Андроида техника», г. Магнитогорск.

В разработке и изготовлении АРТС FEDOR использовалась технология аддитивного производства FDM (Fused Deposition Modeling), моделирование методом послойного наплавления), используемая при создании моделей и прототипировании в промышленном производстве, с применением термопластического материала ULTEM, удовлетворяющего требованиям международных авиационных и космических стандартов, благодаря высокой прочности (включая нагрузки на разрыв), температурной, механической и химической стойкости, что делает данный материал идеальным для изделий, от которых требуется высокая прочность при высоком нагреве, в транспортном машиностроении (авиация и космос, автомобили, поезда, морские суда), оборонной промышленности, инструментальном производстве (термостойких штампов, пресс-форм).

Проведенная в рамках космического эксперимента комплексная проверка АРТС FEDOR подтвердила работоспособность и надежность конструкции АРТС, готовность к проведению эксперимента.

За время эксперимента на борту «Союз МС-14» АРТС FEDOR успешно прошел этапы выведения на орбиту и сопутствующие перегрузки, с сохранением работоспособности при воздействии вибрации и перегрузки, доказав возможность использования изделий аддитивного производства в РТК для космического применения [3].

Несмотря на высокие эксплуатационные качества материала, технология послойного наплавления FDM имеет определенные недостатки, ограничивающие ее широкое применение в реализации целей и задач космических программ. При работе 3D-установки FDM остаются нерешенными ряд вопросов, которые в свою очередь влияют на качество получаемых изделий и требуемый объем постобработки:

- регулирование высоты позиционирования сопла экструдера и скорости печати;
- регулирование температуры печатной платформы и рабочей камеры для обеспечения необходимого времени остывания слоя и предотвращения деформации слоев;
- недо- и переэкструдирование (регулирование расхода полимера для обеспечения ритмичной печати).

С учетом перечисленных вопросов управления в процессе FDM-печати, а также принимая во внимание существенный объем необходимой постобработки изделий для повышения экономической эффективности в АО «НПО «Андроида техника» было принято решение об оснащении участка аддитивных технологий установкой селективного лазерного спекания Farsoon 403P с техническими характеристиками, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Технические характеристики установки селективного лазерного спекания

TECHNICAL DATA	Flight HT403P
External Dimensions (L×W×H)	2470 x 1500 x 2145 mm
Build Cylinder Size1 (L×W×H)	400 x 400 x 540 mm or 400 x 400 x 450 mm
Net Weight	Approx 3000KG
Laser Type	Fiber Laser, 1×500W
Laser Spot Size	Approx 70µm contour, Approx 50µm fill
Scanner	High-precision three-axis digital galvo system
Layer Thickness	0.06-0.3mm
Volume Build Rate <sup>2</sup>	Up to 6L/h
Scanning Speed	Max 20m/s
Max Chamber Temperature	220°C
Thermal Field Control	Multi-zone heater & intelligent temperature control systems
Temperature Regulation	Continuous real-time build surface temperature monitoring & optimization
Operating System	64 bit window 10
Comprehensive Software	Farsoon MakeStar®, MakeStar@
Date File	STL
Key Software Feature	Open machine key parameters, real-time build parameter modification, three-dimensional visualization, diagnostic functions
Inert Gas Protection	Nitrogen
Power Supply	EUR/China: 380-400V, 50/60Hz, three-phase US: transformer sold with machine
Operating Ambient Temperature	22 - 28 °C
Materials	FS3300PA-F, more materials to come

#### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изготовления был выбран пластичный нейлоновый порошок FS3300PA со следующими свойствами:

- насыпная плотность 0,48 г/кв. см;
- плотность деталей 0,95 г/кв. см;
- температура плавления 183С;
- температура теплового отклонения: 83,5 С – 1,8 МПа  
146,2 С – 0,45 МПа;
- предел прочности при растяжении 46 Мпа;
- относительное удлинение при разрыве 36%;
- предел прочности при изгибе 46,3 МПа.

Данный материал позволяет изготавливать опытные образцы и конечные детали с высокими механическими свойствами, плотностью и ударной вязкостью.

В соответствии с целями и задачами изготовления изделий в АО «НПО «Андроида техника» и высокими отраслевыми требованиями к качеству, целесообразно рассмотреть процесс селективного лазерного спекания, его преимущества и возникающие и влияющие на качество изделий параметры.

Селективное лазерное спекание (SLS) на сегодняшний день является одной из наиболее перспективных аддитивных технологий, где в качестве источника тепловой энергии используется лазер для избирательного плавления поверхности порошка полимера. При движении лазерного

луча по геометрии отдельного слоя, энергия пятна луча поглощается слоем, создавая область плавления. После каждого слоя платформа построения опускается на заданную толщину слоя и процесс построения повторяется. Когда прототип или деталь закончены, требуется несколько операций постобработки для очистки порошка, поскольку изделие формируется в слое порошка, однако объем операций постобработки при селективном лазерном спекании кратно меньше, при сравнении с технологией FDM.

Несмотря на значительные преимущества SLS (такие как высокая плотность изделий, точность соответствия геометрии модели и т. д.), с развитием технологии обнаружились некоторые неочевидные недостатки, влияющие на качество конечного изделия.

Температура под лазерным лучом, где происходит плавление, зависит от многих параметров, таких как теплопроводность порошка, мощность лазера и траектория луча. Возникновение и распределение областей расплава на поверхности слоя вызывает тепловое искажение от остаточных напряжений в предварительно спеченном слое. Траектория лазерного сканирования, условия нагрева и охлаждения, температурные градиенты существенно влияют на тепловые искажения в слоях, в результате вызывая размерную деформацию изделия [4, 5, 6].

Несмотря на свои преимущества, технология до сих пор не дает возможности уменьшить количество ошибок управления в ходе технологического процесса. Ошибки настройки и управления установкой проявляются на заключительном этапе цикла изготовления в виде дефектов конечных изделий. В ряде исследований по повышению качества селективного лазерного спекания были достигнуты улучшения в точности построения за счет использования замкнутой системы управления и реализации управления с обратной связью при эксплуатации установки [7, 8].

Диапазон технологических параметров селективного лазерного спекания включает, но не ограничивается мощностью лазера, скоростью сканирования, размером луча и стратегией сканирования.

Плотность мощности лазера обеспечивает требуемое спекание при установленной скорости сканирования, предотвращая перегрев материала, остаточные напряжения в частицах порошка и нижнем слое и, как следствие, размерные искажения. Плотность мощности лазера может быть определена как:

$$Q = \frac{P}{S} V,$$

где P – мощность лазера, Вт; S – площадь пятна от луча на поверхности, мм<sup>2</sup>; V – скорость сканирования, мм/с.

Как и мощность лазера, параметр скорости сканирования также важен для обеспечения правильного плавления. Более низкая скорость сканирования может увеличить плотность мощности лазера, привести к концентрации тепла в зоне спекания и возникновению больших областей расплава. Более высокая скорость сканирования может сократить время производства. С другой стороны, исследованиями было показано, что более высокая скорость сканирования уменьшает ширину областей расплава. Кроме того, очень высокая скорость сканирования мо-

жет не обеспечить достаточного времени для диффузии тепла через слой порошка.

Как правило, мощность лазера экспоненциально уменьшается на расстоянии от центра лазера. Большой размер пятна позволяет быстрее сканировать поверхность порошка и увеличивает ширину области расплава. В то же время большие размеры луча уменьшают плотность конечных деталей. Для изменения размера пятна используется несколько методов. Лазерная расфокусировка позволяет изменить фокусную точку лазера на точку ниже платформы построения, одновременно изменяя распределение лазерной энергии, что влияет на характеристики области расплава [9].

Траектория сканирующего луча может влиять на характеристики изделия, значительно снижать искажения и пористость. Как правило, схема лазерного сканирования строится на параллельных линиях в зигзагообразной схеме, по длине или ширине детали. Предыдущие исследования показали зависимость между стратегией сканирования и плотностью конечной детали. Переменная траектория луча помогает уменьшить возникновение остаточных напряжений и избежать нежелательных дефектов в результате. Кроме того, более короткие длины сканирования помогают гарантировать, что затвердевание не произойдет до обратного хода лазера. Затвердевание в середине слоя является одним из дефектов производства, так как оно вызывает неправильное сцепление между слоями и увеличивает искажения, происходящие в нижних слоях.

Альтернативной стратегией сканирования может быть схема с квадратными ячейками, где слой построения разделен на ячейки или сектора. Каждую ячейку можно сканировать независимо в чередующемся порядке. Такая стратегия дает возможность уменьшить послойные искажения за счет схемы распределения тепла.

Упомянутые выше стратегии не ограничиваются описанными схемами, были опробованы и другие подходы сканирования, такие как спиральный, диагональный, фрактальный и другие.

В соответствии с логикой и опытом селективного лазерного спекания изготовители установок и эксплуатирующие предприятия рекомендуют осуществлять построение изделий, используя Z-схему построения.

Влияние характеристик порошка на конечные характеристики детали так же важно, как и другие параметры. Размер частиц порошка и толщина слоев являются определяющими параметрами процесса SLS. Очевидно, что деталь может быть построена быстрее, если используются более толстые слои; однако это уменьшает плотность изделия [10, 11].

Влияние мощности лазера на поведение частиц порошка и фазовое превращение изучалось исследователями с использованием метода конечных элементов FEA для выявления зависимости протекания процесса спекания от характеристик порошка и мощности лазера. В процессе моделирования были проанализированы механизм теплопередачи, скорость лазерного луча, мощность лазера и размер пятна с целым рядом результатов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Несмотря на присущие методу FEA упрощения, были получены значимые для применения в практическом изготовлении изделий выводы:

- влияние мощности лазера на температуру порошкового слоя было проверено с помощью моделирования на двух скоростях. Прогнозируемая температура на поверхности слоя порошка увеличивается почти линейно с мощностью лазерного луча, но не может быть воспроизведена на глубине спекания порошка из-за нелинейного теплообмена в материале;

- при измерении изменения деформации выбранного места в процессе спекания для некоторых типов порошков были обнаружены большие области растяжения в верхнем слое;

- схема с квадратными ячейками или сканирование по кратчайшему размеру уменьшают остаточные напряжения;

- более толстые детали охлаждаются быстрее, имея большие температурные градиенты и более высокие остаточные напряжения [12].

Предыдущие попытки уменьшить остаточные напряжения и деформации были сосредоточены на нагреве слоя порошка, и этот подход был частично полезен для полимерных порошков.

Однако последние исследования не дают четкого научно обоснованного алгоритма выбора и управления параметрами процесса снижения остаточных напряжений и тепловых искажений при селективном лазерном спекании.

Используемый в аддитивном производстве луч Гаусса дает возможность оценить поглощающую способность порошка в зависимости от длины луча лазера, его мощности и размера поверхности частиц, получающих прямое излучение от лазера, что в совокупности значимо для оценки процесса спекания. Интенсивность уменьшается экспоненциально по мере увеличения расстояния от центра луча.

Существует ряд подходов к моделированию проникновения лазерной энергии в слой порошка. Одним из вариантов является моделирование физического воздействия лазерного луча на окружающие частицы с помощью трассировки лучей.

Альтернативный подход заключается в оценке снижения воздействия мощности лазера по коэффициенту поглощения порошка, пористости и диаметру частиц [13].

Выявленные корреляции между параметрами процесса селективного лазерного спекания будут учитываться при управлении установкой селективного лазерного спекания и оптимизации качества печати.

Применение комплектующих изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного спекания, предусмотрено в рамках составной части опытно-конструкторской работы АО «НПО «Андроидная техника» по созданию Универсального комплекса робототехнических систем для подготовки космонавтов к полетам, с соответствующими отраслевыми требованиями к качеству изделий.

По спроектированным моделям деталей Универсального комплекса робототехнических систем было проведено опытное изготовление изделий.

Первые опытные образцы изделий показали наличие дефектов печати, требующие выяснения и устранения причин для обеспечения соответствия разработанным CAD-моделям (рис.1).

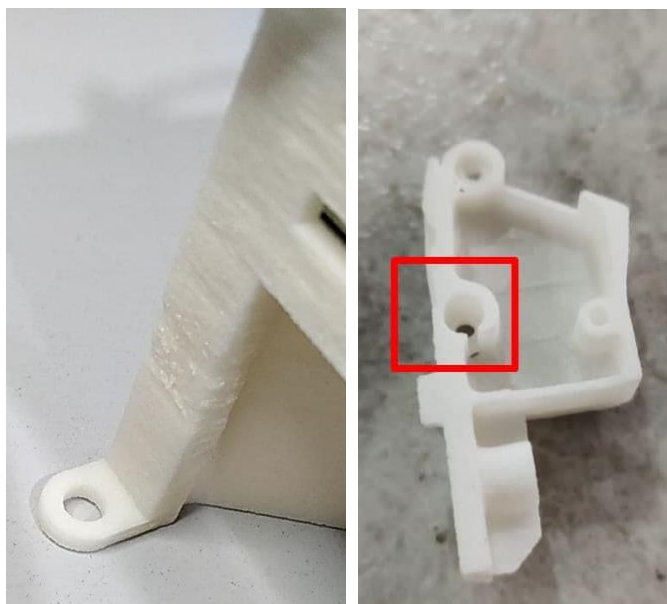


Рис.1. Дефект нарушения геометрии изделия и не пропечатанных участков, при применении технологии селективного лазерного спекания (на двух образцах изделий).

Возникновение подобного рода дефектов, вызванных высоким остаточным напряжением, пористостью и деформацией, вызвало необходимость определения и корректировки технологических параметров процесса изготовления для повышения точности соответствия CAD-моделям и обеспечения качества конечных изделий.

Группой специалистов производства, службы качества и ведущим технологом АО «НПО «Андроидная техника» было принято решение о разделении параметров процесса на следующие категории:

1. Управляемые параметры (внутренние и внешние), которые могут быть идентифицированы и непрерывно модифицированы (например, условия эксплуатации, температурный режим помещения, в котором находится установка лазерного спекания, температурный режим в процессе остывания, мощность лазера, скорость сканирования);

2. Предустановленные параметры, которые определяются в начале производства, такие как размер порошка и толщина слоя;

3. Наблюдаемые параметры, которые могут быть измерены в процессе спекания.

Оптимизация процесса управления установкой селективного лазерного спекания планируется в несколько этапов в соответствии с уровнем сложности описанных параметров процесса.

В обеспечение корректной работы установки спекания основным требованием качественной работы установки является соответствие условий эксплуатации установки спекания заданным производителем. Для этого был проведен аудит внешних параметров процесса печати, таких как температурный режим помещения, в котором

находится установка лазерного спекания, температурный режим в процессе остывания напечатанных изделий. По решению группы специалистов АО «НПО «Андроидная техника» имевшиеся отклонения могли оказывать влияние на возникновение дефектов и деформаций. Участок селективного лазерного спекания был дополнительно оснащен системой вентиляции и регулировки температурного режима.

Запуск печати после оптимизации условий эксплуатации установки селективного лазерного спекания показал улучшенные результаты печати. На рис. 2 представлен результат изготовления детали изделия. Можно видеть дефекты в виде полос, а также несоответствие точности радиусов скругления. Вместе с тем, в результате оптимизации температурного режима процесса спекания и остывания удалось достичь отсутствия деформации и непропечатанных участков.



Рис. 2. Деталь, изготовленная методом селективного лазерного спекания, на установке Farsoon 403P

Уменьшение деформации и непропечатанных участков безусловно повышает качество конечных изделий, однако в процессе селективного лазерного спекания требуется обеспечение заданной точности изделий.

Для определения наличия расхождений между моделью и конечным изделием на образце (рис.3) с заданными размерами были проведены измерения, которые дают понимание требуемого объема настройки управления оборудованием и служат начальной точкой для определения снижения несоответствий и повышения точности конечного изделия.

Для этого производилось изменение настроек режима спекания на установке Farsoon 403P которые заданы производителем в виде числовых параметров. Изменение настройки приводит к изменению мощности и диаметра луча, а также к скорости перемещения стола.

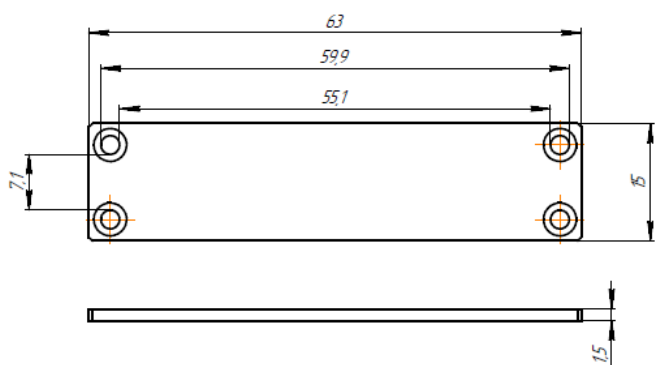


Рис. 3. Заданные моделью размеры изделия

Таблица 2

Результаты измерений размеров конечного изделия

Режимный параметр	Заданные и действительные геометрические размеры элементов изделия						
	63	7,1	55,1	59,9	15	1,5	Диаметр отверстия 2,4
1	62,95	7,1	55	59,9	14,8	1,55	2,5
2	62,9	7,05	55,05	60	14,8	1,55	2,5
3	62,95	7,1	55,1	59,95	14,8	1,55	2,5
4	62,9	7,1	55,1	59,9	14,8	1,55	2,5
5	62,9	7,1	55,1	60	14,8	1,55	2,5

В табл. 2 представлены результаты измерений размеров конечного изделия, полученного в процессе селективного лазерного спекания. Проанализировав данные визуального контроля и замеров, можно сделать вывод о том, что при построении наблюдается геометрия модели без деформаций, однако за счет остаточных напряжений размеры изделия имеют существенные отклонения от заданных.

Поскольку, как было отмечено выше, при проектировании и разработке изделий для космических программ ключевыми требованиями являются качество материалов и точность, отдельное внимание на следующем этапе оптимизации управления селективным лазерным спеканием будет уделено точному соответствию конечных изделий заданным CAD-моделям, а значит настройке параметров установки лазерного спекания для обеспечения соответствия размеров моделей с учетом допусков.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оптимизации управления селективным лазерным спеканием планируется провести ряд измерений температурных градиентов поверхности слоя построения, выбрать методы определения остаточных напряжений и с учетом параметров мощности лазерного луча и скорости спекания разработать алгоритм управления движением луча лазера для обеспечения полного соответствия получаемых спеканием образцов заданным моделям и как следствие качества конечных изделий.

Отраслевые требования к качеству в рамках выполняемых работ по космическим программам, а также разви-

вающиеся подходы к проектированию и переход к бионическим принципам проектирования требуют обеспечения точности воплощения модели в материале, что подразумевает отлаженную систему управления аддитивным производством для получения изделий с любыми толщинами, искривлениями, полостями, сетчатой и ячеистой структурами, обладающей большей прочностью и устойчивостью к нагрузкам.

Практическая оценка влияния параметров (чувствительных к изменениям окружающей среды и влияющих друг на друга), таких как мощность лазера, теплопередача и скорость сканирования, на тепловую деформацию будет детально исследована на следующих этапах работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Generative Design: advice from algorithms. Kenneth Wong, 2018, Digital Engineering
2. Бионический (генеративный) дизайн и аддитивное производство, [https://3d.globatek.ru/world3d/generative\\_design/](https://3d.globatek.ru/world3d/generative_design/).
3. Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Шпонецко А.А. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «FEDOR» // Известия высших учебных заведений Северо-кавказский регион. 2020. №3. -С. 64-72
4. The Setup Design for Selective Laser Sintering of High-Temperature Polymer Materials with the Alignment Control System of Layer Deposition, Process Innovation in digital manufacturing, march 2018.
5. Temperature-Controlled Selective Laser Sintering, J. A. Benda, United Technologies Research Center, East Hartford, CT 06108.
6. Modelling and Control of Heat Distribution in a Powder Bed Fusion 3D Printer, Division of Automatic Control, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 2019
7. Design of Versatile Feedback Control System Components for Selective Laser Sintering. Thomas Chessman. University of Connecticut. Spring 5-22-2020. University Scholar Projects.
8. Feedback control of Selective Laser Melting, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Division PMA, Belgium, 2007.
9. Effects of Fabrication Parameters on the Properties of Parts Manufactured with Selective Laser Sintering: Application on Cement-Filled PA12, March 2019, Advances in Materials Science and Engineering
10. Processing Parameters for Selective Laser Sintering or Melting of Oxide Ceramics, Haidong Zhang and Saniya LeBlanc, IntechOpen.
11. Multiphysics Modeling of Selective Laser Sintering/Melting, 2015, Ganeriwala Rishi, University of California, UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations.
12. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing, Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16801, USA, September 2016.
13. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process, Université e Louis Pasteur, IMFS (UMR 7507 CNRS), 2 Rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France, 2009.



# OPTIMIZING THE CONTROL OF THE SELECTIVE LASER SINTERING PROCESS TO INCREASE THE QUALITY OF ADDITIVE PRODUCTS FOR SPACE PROGRAMS

E.A. Dudorov<sup>1</sup>, S.M. Andreev<sup>2</sup>, K.A. Kotova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JSC «Scientific Production Association "Android Technics"», Moscow, Russia

<sup>2,3</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup>[andreev.asc@gmail.com](mailto:andreev.asc@gmail.com), <sup>3</sup>[kotova-ks@mail.ru](mailto:kotova-ks@mail.ru)

**Abstract.** Review of modern approaches to the production and design of samples and products has been implemented. The key requirements for products created under the programs of the State Space Corporation ROSCOSMOS, as well as design methods and manufacturing technologies are identified. On the example of a space experiment with the participation of a robotic complex created with additive technologies, the possibility of using products of additive manufacturing in conditions of increased quality requirements, taking into consideration the inherent operating conditions of loads (space flights and the conditions imitating them), has been confirmed. The process of layer-by-layer deposition in additive manufacturing is considered as one of the technologies used for the manufacture of space-related products; the disadvantages of this technology at the stages of the product's life cycle are also noted. As an alternative to layer-by-layer deposition, the technology of selective laser sintering is considered with a review of the parameters of the process. The results of experimental fabrication of products using selective laser sintering technology, as well as manufacturing defects that have taken place are presented. A brief analysis of the causes and possibilities of eliminating the discrepancies between the final products and the CAD models is carried out. The parameters of the selective laser sintering process are classified for subsequent analysis of their influence, calculations and measurements. The results of optimization of a number of process parameters are shown, and further studies are planned with calculations and measurements and the development of an algorithm for controlling the selected parameter to ensure the accuracy and quality of the final products.

**Keywords:** selective laser sintering, CAD model, residual stresses, design and development, deformation, strength.

## REFERENCES

1. Generative Design: advice from algorithms. Kenneth Wong, 2018, Digital Engineering
2. Bionic (generative) design and additive manufacturing, [https://3d.globatek.ru/world3d/generative\\_design/](https://3d.globatek.ru/world3d/generative_design/).
3. A.F. Permyakov, E.A. Dudorov, I.G. Sokhin, A.A. Shponko Preparing and performing a space experiment with use of the anthropomorphic robot «FEDOR». UNIV. NEWS. NORTH-CAUCAS. REG. TECHNICAL SCIENCES SERIES. 2020; 3: 64-72
4. The Setup Design for Selective Laser Sintering of High-Temperature Polymer Materials with the Alignment Control System of Layer Deposition, Process Innovation in digital manufacturing, march 2018.
5. Temperature-Controlled Selective Laser Sintering, J. A. Benda, United Technologies Research Center, East Hartford, CT 06108.
6. Modelling and Control of Heat Distribution in a Powder Bed Fusion 3D Printer, Division of Automatic Control, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 2019
7. Design of Versatile Feedback Control System Components for Selective Laser Sintering. Thomas Chessman. University of Connecticut. Spring 5-22-2020. University Scholar Projects.
8. Feedback control of Selective Laser Melting, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Division PMA, Belgium, 2007.
9. Effects of Fabrication Parameters on the Properties of Parts Manufactured with Selective Laser Sintering: Application on Cement-Filled PA12, March 2019, Advances in Materials Science and Engineering
10. Processing Parameters for Selective Laser Sintering or Melting of Oxide Ceramics, Haidong Zhang and Saniya LeBlanc, IntechOpen.
11. Multiphysics Modeling of Selective Laser Sintering/Melting, 2015, Ganeriwala Rishi, University of California, UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations.
12. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing, Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16801, USA, September 2016.
13. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process, Université Louis Pasteur, IMFS (UMR 7507 CNRS), 2 Rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France, 2009.

---

Дудоров, Е.А. Оптимизация управления процессом селективного лазерного спекания с целью повышения качества изделий аддитивного производства для космических программ / Е.А. Дудоров, С.М. Андреев, К.А. Котова // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.18-24.

---

Dudorov E.A., Andreev S.M., Kotova K.A. Optimizing the control of the selective laser sintering process to increase the quality of additive products for space programs. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.18-21. (In Russian).

УДК 658.52.011.56

## СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Я.А. Степанова<sup>1</sup>, С.А. Зыкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, Лысьва, Россия

<sup>1</sup>e-mail: [yanastepanova54@gmail.com](mailto:yanastepanova54@gmail.com), <sup>2</sup>e-mail: [zykin\\_sergey@mail.ru](mailto:zykin_sergey@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена задача об оптимальном геометрическом покрытии. Эту задачу нельзя решить точным методом, все её решения будут приближёнными. Поэтому до сих пор остаётся актуальным вопрос подбора алгоритмов, результат работы которых будет максимально приближен к точному решению задачи. Был проведён сравнительный анализ трёх алгоритмов: жадный, «первый подходящий», вероятностный. Анализ проводился методом сравнения алгоритмов по нескольким критериям.

**Ключевые слова:** геометрическое покрытие, жадный алгоритм, первый подходящий алгоритм, вероятностный алгоритм, оптимизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Раскрой и размещение деталей с учетом геометрических особенностей является частым этапом в технологических процессах различных отраслей промышленности, строительства и дизайна. Этот вопрос является одним из важнейших, так как от его решения зависит экономия ресурсов. Для описания подобных проблем используются оптимизационные задачи геометрического размещения. Базовыми задачами геометрического размещения являются следующие: раскрой линейного (одномерного) материала; раскрой листов на прямоугольные заготовки; упаковка трехмерных контейнеров; размещение и раскрой фигурных объектов в заданной области; максимальное покрытие линейного материала; прямоугольное геометрическое покрытие[1].

Главной целью задач геометрического покрытия является минимизация расхода материала и максимизация размера покрываемых элементов.

Реализация алгоритмов решения данных задач до сих пор остаётся актуальной задачей, потому как на данный момент не все известные алгоритмы являются высокоэффективными и могут использоваться в больших масштабах.

В статье будет рассмотрено решение задач оптимального геометрического покрытия с помощью жадного, вероятностного и «первого подходящего» алгоритмов.

### СУТЬ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Для постановки задачи необходимо изучить некоторые теоретические понятия. Под пространством понимают множество некоторых объектов, правила работы с ними и

набор аксиом, которым эти правила должны подчиняться [2]. Одной из важнейших характеристик пространства является его размерность. С точки зрения аналитической геометрии, размерность фигуры равна числу координат, нужных для определения положения лежащей на этой фигуре точки[3]. Примером двумерного пространства является плоскость, точки которой задаются двумя координатами. Плоские объекты характеризуются не только длиной, но и шириной.

Итак, дан двумерный объект, занимающий некоторое определенное положение в пространстве, а также имеет известные размеры. Он обладает вполне определенной пространственной формой. Три ранее перечисленные свойства объекта можно описать в одном понятии – геометрическая информация об объекте. Такую информацию можно представить в следующем виде:

$$D=\{(f),(s),(p)\} \quad (1)$$

где  $f$  - множество форм, которые может принимать геометрический объект;  $s$  - размерные характеристики объекта;  $p$  - параметры, задающие местоположение объекта в пространстве.

Помимо этого имеются покрывающие элементы произвольной размерности и формы в количестве  $n$  штук. Они также имеют собственные геометрические характеристики.

Суть задачи состоит в том, чтобы расположить на заданном объекте имеющиеся элементы так, чтобы поверхность

объекта была полностью покрыта. Необязательно использовать все  $n$  элементов.

Пусть дан геометрический объект, который имеет форму прямоугольника размерами 5 на 7 условных единиц измерения длины.

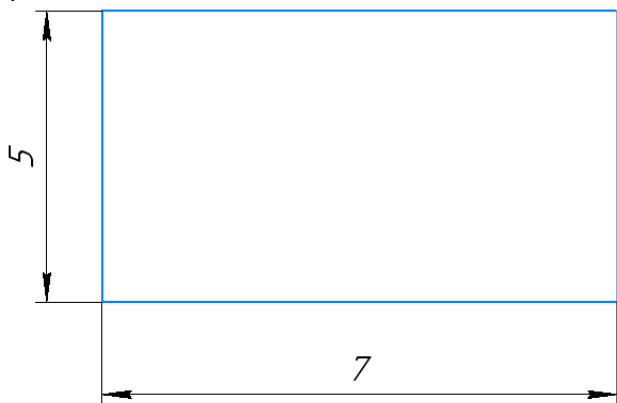


Рис. 1. Геометрический объект

Также дано 9 элементов разнообразных форм и размеров (Рис. 2).

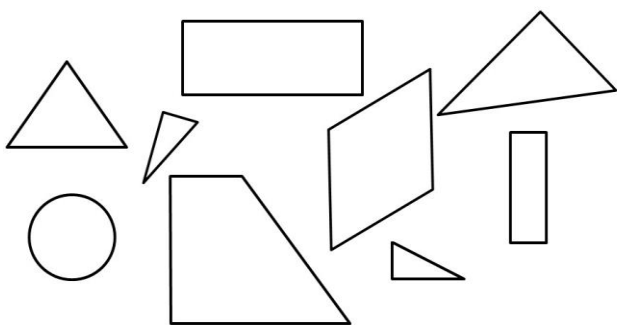


Рис. 2. Элементы-покрышки

Расположение покрывающих элементов на объекте для решения задачи представлено на рис. 3.

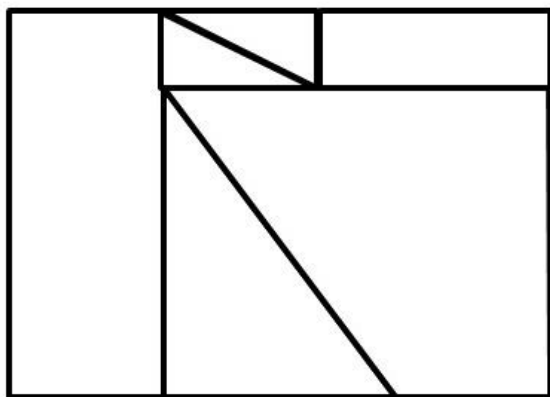


Рис. 3. Расположение элементов для решения задачи

Часто в постановке задачи добавляется условие использования минимального количества элементов. Поэтому алгоритмы решения задачи геометрического покрытия должны учитывать это условие.

## АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

### ЖАДНЫЙ АЛГОРИТМ

Главная идея жадного алгоритма заключается в принятии решения по принципу «здесь и сейчас». В алгоритме всегда делается выбор, который считается наиболее оптимальным в данный момент — т.е. производится локальный выбор в надежде на то, что он приведёт к наилучшему решению комплексной задачи [4].

Для решения задачи геометрического покрытия этот алгоритм реализован таким образом, что на каждом шаге происходит выбор  $m$ -го количества элементов, с помощью которых можно покрыть максимальную площадь заданного объекта.

На каждом этапе работы жадный алгоритм запоминает непокрытую часть объекта и незадействованные элементы-покрышки. Далее следует принятие решения. Выбираются элементы, с помощью которых в текущий момент времени покрывается наибольшее количество пустых участков объекта. Все покрывающие элементы содержатся в множестве, поэтому после выбора элементы удаляются из множества.

### АЛГОРИТМ ПЕРВЫЙ ПОДХОДЯЩИЙ

Алгоритм «первый подходящий» предполагает покрытие объекта первым попавшимся незанятым элементом [5]. Покрытие происходит слева направо, сверху вниз.

Получение хорошего результата при использовании такого алгоритма не гарантировано. Однако, «первый подходящий» может гарантировать получение хорошего начального приближения. В некоторых случаях результат работы алгоритма может быть даже лучше, чем результаты работы более сложных алгоритмов. Это обусловлено большим количеством повторений и зависимостью результата от вероятности. Несмотря на большое количество выполнений, алгоритм не требует больших вычислительных ресурсов, и время работы алгоритма сравнительно небольшое. Конечно, многое зависит от поставленной задачи, ведь чем сложнее форма поверхности и более разнообразные покрывающие объекты, тем хуже работает «первый подходящий» алгоритм.

### ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АЛГОРИТМ

Вероятностный алгоритм — это алгоритм, предусматривающий обращение на определенных этапах своей работы к генератору случайных чисел с целью получения экономии во времени работы за счет замены абсолютной достоверности результата достоверностью с некоторой вероятностью [6].

Первым шагом для каждого элемента из множества покрывающих элементов находится вероятность его использования. Вероятность использования зависит от площади покрываемого объекта. Затем элементы сортируются в порядке уменьшения вероятности их использования. Далее с помощью применения доверительного коэффициента некоторое количество раз осуществляется покрытие по принципу работы «первого подходящего» алгоритма. Доверительный коэффициент имеет начальное значение, равное единице. Суть работы этого алгоритма состоит в «примерке» элемента на каждое свободное место. Если вероятность использования элемента удовлетворяет

доверительному коэффициенту, то он устанавливается на место, иначе коэффициент уменьшается.

#### СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Для решения задачи важным фактором является точность результата и быстродействие алгоритма. Поэтому эти факторы будут являться основными критериями сравнения алгоритмов. Также среди критериев стоит отметить сложность реализации на языках программирования.

Гарантированность точных результатов работы алгоритма сильно зависит от исходных данных, так как в условии задачи может быть дан набор элементов-покрывателей, при котором решение задачи не будет оптимальным или его не будет вовсе. Поэтому сравнение алгоритмов по критерию точности результата будет происходить по специально подобранным данным (будет дан набор покрывающих элементов, который гарантирует оптимальный результат)

Простота реализации одного и того же алгоритма на разных языках программирования всегда различна. Это обусловлено наличием или же отсутствием библиотек, упрощающих реализацию кода, навыками разработчика и ожидаемым результатом. Поэтому данный критерий рассматривается не для конкретного языка программирования.

Таблица 1 Сравнительный анализ алгоритмов

Характеристики алгоритмов	Алгоритмы		
	Жадный	«Первый подходящий»	Вероятностный
Точность результата	Алгоритм делает выбор пошагово, а не комплексно. Такой подход не гарантирует оптимального результата. Алгоритм можно считать приближенным к точным результатам.	Результаты работы алгоритма не предсказуемы. В каких-то случаях результат будет приближенным, в каких-то случаях результат не будет получен вовсе, а иногда алгоритм даёт результаты наиболее точные по сравнению с другими сложными алгоритмами.	Алгоритм даёт приближенный к точному результат.
Скорость работы	Высокая	Высокая	Высокая
Сложность реализации	Средняя	Несложная	Средняя

Алгоритмы сравнивались по трём критериям. Результаты представлены в таблице 1. Каждый из них имеет свои

преимущества и недостатки по сравнению с другим алгоритмом. Выбор алгоритма по вышеуказанным критериям должен строиться, в зависимости от цели его использования. Если главным фактором выбора является результат, то стоит остановиться на «Жадном» алгоритме. «Первый подходящий» алгоритм может быть выбран, как наиболее удобный, разработчикам, так как его реализация легче, чем у двух других алгоритмов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача о покрытии геометрического двумерного объекта некоторым количеством геометрических элементов различной формы. Проведён сравнительный анализ алгоритмов решения задачи. На его основе можно прийти к выводу о том, что на данный момент нет алгоритма, который бы подбирал точное решение задачи, затрачивая при этом минимальное количество времени и памяти. Каждый из рассмотренных алгоритмов имеет достоинства и недостатки. Поэтому при выборе способа решения задачи о геометрическом покрытии необходимо опираться на критерии, важные для отдельно взятого человека. Это может быть точность расчётов, быстрота выполнения, лёгкость реализации и т.д.

Изученная тема является хорошей отправной точкой для дальнейших исследований алгоритмов решения задачи геометрического покрытия. До сих пор остаётся актуальным создание алгоритмов с более точными результатами. На основе рассмотренных алгоритмов можно реализовать новые методы решения, удовлетворяющие всем критериям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Филиппова, Ю. И. Валиахметова, Э. И. Дьямина. Конструирование алгоритмов геометрического размещения на основе матричной и уровневой технологий. – Уфа, 2016. – 11с.
2. Д. Д. Гушин. Пространство как математическое понятие.
3. Александров П. С., Пасынков Б. А. Введение в теорию размерности. - М., 1973. – 577с.
4. А. В. Еремеев, Л. А. Заозерская, А. А. Колоколов. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования, Дискретн. анализ и исслед. опер. - М., 2000.
5. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. - М., 2012. - 380 с
6. Забелин С.Л., Фроловский В.Д. Исследование метаэвристических алгоритмов для задач оптимального геометрического покрытия. Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении. – М., 2012.

# COMPARISON OF ALGORITHMS FOR SOLVING THE PROBLEM OF GEOMETRIC COVERAGE

Ya.A. Stepanova<sup>1</sup>, S.A. Zykin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Lysva Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Lysva, Russia

**Abstract.** The problem of optimal geometric coverage is considered. This problem cannot be solved by an exact method, all its solutions will be approximate. Therefore, the question of selecting algorithms, the result of which will be as close as possible to the exact solution of the problem, remains relevant. A comparative analysis of three algorithms was carried out: greedy, "first suitable", probabilistic. The analysis was carried out by comparing algorithms using several criteria.

**Keywords:** Geometric Coverage, Greedy Algorithm, First Match Algorithm, Probabilistic Algorithm, Optimization.

## REFERENCES

1. A.S. Filippova, Yu. I. Valiakhmetova, E. I. Dyaminov. Design of geometric placement algorithms based on matrix and level technologies. - Ufa, 2016. -- 11p.
2. D.D. Gushchin. Space as a mathematical concept.
3. Aleksandrov PS, Pasyukov BA Introduction to dimension theory. - M., 1973. -- 577s.
4. A. V. Ereemeev, L. A. Zaozerskaya, A. A. Kolokolov. The problem of covering a set: complexity, algorithms, experimental research, Diskretn. analysis and issled. opera. - M., 2000.
5. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M., Sorokoletov P.V. Bioinspired methods in optimization. - M., 2012. - 380 s
6. Zabelin S.L., Frolovsky V.D. Study of metaheuristic algorithms for optimal geometric coverage problems. Advanced information technology in research, design and training. - M., 2012.

---

Степанова, Я.А. Сравнение алгоритмов для решения задачи геометрического покрытия / Я.А. Степанова, С.А. Зыкин // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.25-28.

Stepanova Ya.A., Zykin S.A. Comparison of algorithms for solving the problem of geometric coverage. Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.25-28. (In Russian).

УДК 629.7.052

## ИСКУССТВЕННЫЙ ЕМКОСТНЫЙ МАХОВИК С ВОЗМОЖНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

**Аннотация.** Целью исследования является математическое моделирование искусственного момента инерции. Актуальность работы определяется возможностью замены массивных маховиков. Используются методы теоретической электротехники. Результаты: получена искусственная электромагнитная масса, под которой следует понимать величину, неотличимую от «натуральной» массы, т.е. удовлетворяющую второму закону Ньютона. Выводы: устройство с искусственным моментом инерции, может использоваться в качестве маховиков с возможностью автоматического регулирования момента инерции.

**Ключевые слова:** масса, момент инерции, электрическая машина, конденсатор.

### ВВЕДЕНИЕ

В классической механике механическая величина инертная масса  $m$  по существу определяется основной аксиомой динамики – вторым законом Ньютона. При этом «натуральная» масса объекта пропорциональна количеству вещества, заключенного в нем.

Под искусственной массой следует понимать величину, неотличимую от «натуральной» массы, т.е. удовлетворяющую второму закону Ньютона. Инертность искусственной массы обуславливается не количеством вещества, а некими другими физическими обстоятельствами.

Цель исследования состоит в разработке искусственно-емкостного маховика с возможностью автоматического регулирования момента инерции.

Предпосылкой решения этой задачи является одна из двух систем аналогий между электромагнитными и механическими величинами, в соответствии с которыми масса связана дуальным соотношением с емкостью

$$m \Rightarrow C.$$

Однако дуальная связь не является функциональной, поскольку охватываемые ею величины относятся к изолированным друг от друга системам. Поэтому возможность использования конденсатора для создания искусственного момента инерции может быть реализована в смешанной, т.е. электромеханической системе. Устройство, обладающее искусственным моментом инерции, может иметь существенно низкий вес и использоваться вместо массивных маховиков.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используются методы математического моделирования и электротехнические расчеты.

Использованные методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Устройство конструктивно может быть выполнено, например, в виде электрической машины постоянного тока независимого возбуждения или вентильной электрической машины, в якорную цепь которой включен конденсатор емкостью  $C$  (см. рисунок). Количество витков якорной обмотки –  $w$ , длина их активной части –  $l$ , индукция магнитного поля –  $B$ , диаметр ротора электрической машины –  $D$ . Масса, трение, активное сопротивление и индуктивность обмотки не учитываются.

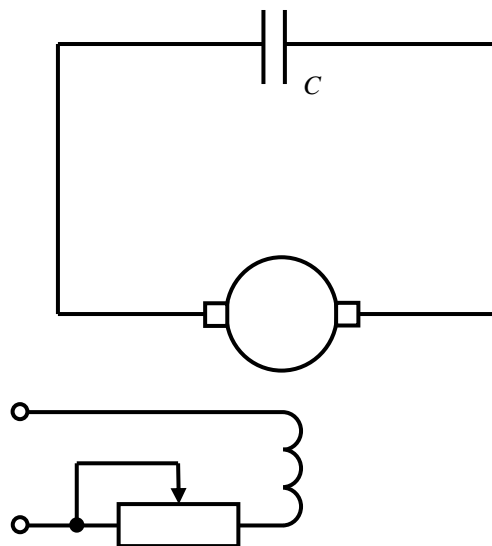


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства

При вращении якоря в обмотке возникает ЭДС электромагнитной индукции

$$e_i = -B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt}.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$BlwD \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{C} \int_0^i idt.$$

Здесь правая часть – напряжение на конденсаторе,  $i$  – ток. Производная этого выражения

$$BlwD \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{C} i,$$

$$i = BlwDC \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

С учетом последнего соотношения запись вращательного аналога закона Ампера применительно к машине постоянного тока или вентильной имеет вид:

$$M = B2lw \frac{D}{2} i = (BlwD)^2 C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (1)$$

Однако это также запись аналога второго закона Ньютона для вращательного движения, посредством которого можно определить момент инерции. В соответствии с этим

$$J_C = (BlwD)^2 C \quad (2)$$

– искусственный или емкостной момент инерции. В этой связи рассмотренное устройство можно считать электромагнитным маховиком.

В математическом отношении выражение (2) идентично формуле для инертной емкости

$$C_J = \frac{J}{(BlwD)^2}.$$

Формулу (1) можно преобразовать следующим образом.

$$M = J_C \frac{d^2\varphi}{dt^2} = J_C \frac{d\omega}{dt},$$

$$dL = Mdt = J_C d\omega,$$

$$L = J_C \omega.$$

Здесь  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора электро-механического преобразователя,  $L$  – момент количества движения.

Очевидно, что на основе линейной электрической машины может быть реализована искусственная масса [1]

$$m_C = (Blw)^2 C.$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственный момент инерции (искусственная масса) принципиально отличается от аналогии между массой и емкостью, поскольку электромагнитные аналоги не могут применяться в качестве элементов механических систем.

Механическое устройство при взаимодействии с электромагнитным маховиком, обладающим искусственным моментом инерции, «не отличает» его от маховика с «натуральным» моментом инерции [2–5], при этом идеализированный вариант первого не имеет гравитационной массы.

Искусственный или емкостной момент инерции (2) функционально зависит от электромагнитных величин, что создает возможность его автоматического регулирования [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, И.П. Искусственные масса и упругость / И.П. Попов // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 1(29). С. 7–11.
2. Война, А.А. Расчет удельной энергоемкости рекуператора транспортного средства, оснащенного маховиком и упругими элементами / А.А. Война, С.Б. Бережной // Приводы и компоненты машин. 2016. № 3 (20). С. 5-7.
3. Терехов, Г.П. Управление роботом-шаром с помощью маховиков / Г.П. Терехов, В.Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 16. С. 1-31.
4. Овчинников, М.Ю. Движение спутника, оснащенного тангажным маховиком и магнитными катушками, в гравитационном поле / М.Ю. Овчинников, Д.С. Ролдугин, В.И. Пеньков, Р. Варатарая, В.С. Рябиков // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 3. С. 218-225.
5. Сенников, В.А. Влияние дополнительного маховика на коэффициент загрузки двигателя / В.А. Сенников, С.В. Щитов, А.В. Якименко, С.А. Иванов, А.Б. Жирнов // Научное обозрение. 2015. № 17. С. 45-48.
6. Самарина, И.Г. Система экстремального регулирования с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра / И.Г. Самарина, Ю.С. Толстова, В.А. Газизова // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №2(20). С.14-18

## ARTIFICIAL CAPACITIVE FLYWHEEL WITH THE POSSIBILITY OF AUTOMATIC REGULATION OF THE MOMENT OF INERTIA

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia  
e-mail: i.popow@yandex.ru

**Abstract.** The aim of the research is mathematical modeling of an artificial moment of inertia. The relevance of the work is determined by the possibility of replacing massive flywheels. The methods of theoretical electrical engineering are used. Results: an artificial electromagnetic mass

was obtained, which should be understood as a value indistinguishable from the "natural" mass, i.e. satisfying Newton's second law. Conclusions: a device with an artificial moment of inertia can be used as flywheels with the ability to automatically control the moment of inertia.

**Keywords:** mass, moment of inertia, electric machine, capacitor.

#### REFERENCES

1. Popov I.P. Artificial mass and elasticity. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tver State Technical University], 2016. no. 1(29). pp. 7–11. (In Russian)
2. Voyna A.A., Berezhnoy S.B. Calculation of the specific energy consumption of a recuperator of a vehicle equipped with a flywheel and elastic elements. *Privody i komponenty mashin* [Machine drives and components], 2016. no. 3 (20). pp. 5-7. (In Russian)
3. Terekhov G.P., Pavlovsky V.E. Control of a robot-ball using flywheels. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Preprints of the Institute of Applied Mathematics M.V. Keldysh], 2017. no. 16. pp. 1-31. (In Russian)
4. Ovchinnikov M. Yu., Roldugin D.S., Penkov V.I., Varatarao R., Ryabikov V.S. Movement of a satellite equipped with a pitch flywheel and magnetic coils in a gravitational field. *Kosmicheskiye issledovaniya* [Space Research], 2017. Vol. 55. no. 3. pp. 218-225. (In Russian)
5. Sennikov V.A., Shchitov S.V., Yakimenko A.V., Ivanov S.A., Zhirnov A.B. The influence of an additional flywheel on the engine load factor. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2015. no. 17. pp. 45-48. (In Russian)
6. Samarina I.G., Tolstova Yu.S., Gazizova V.A. Extreme control system with remember of the maximum speed of change of the output parameter. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2019, no. 2(20), pp.14-88. (In Russian)

---

Попов, И.П. Искусственный емкостный маховик с возможностью автоматического регулирования момента инерции / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.29-31.

I.P. Popov Artificial capacitive flywheel with the possibility of automatic regulation of the moment of inertia. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.29-31. (In Russian).



## МИНИМИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

**Аннотация.** Показано, что при работе вибрационных машин развивается значительная механическая реактивная мощность, обусловленная массой рабочих органов. Механическая реактивная мощность трансформируется в реактивную электрическую мощность, потоки которой в питающей сети порождают существенные тепловые потери в проводах. В результате имеет место экологический ущерб за счет рассеивания теплоты в атмосферу. Во многих вибрационных машинах с двумя массивными рабочими органами фазы их колебаний смещены на половину периода колебаний. Очевидно, что результирующая мощность равна удвоенной реактивной мощности каждого рабочего органа. Для компенсации реактивной механической мощности фазы колебаний массивных рабочих органов следует сместить на четверть периода колебаний. При этом результирующая мощность равна нулю. Это означает, что энергия торможения одного массивного рабочего органа расходуется на ускорение другого, а не передается приводу и далее в сеть. Таким образом, энергия питающей сети расходуется только на возмещение потерь на трение и на собственно технологический процесс, что приводит к минимизации экологического ущерба от вибрационных машин.

**Ключевые слова:** гармонический процесс, реактивная мощность, компенсация, смещение фазы колебаний.

## ВВЕДЕНИЕ

Во многих конструкциях вибрационных машин, применяемых в производстве, рабочие органы совершают возвратно-поступательные движения при помощи эксцентрикового механизма. При этом возникают переменные по величине и направлению силы инерции. Работа рабочих органов вибрационных машин является характерным примером внешних периодических воздействий периода на массивные объекты. Реакция рабочих органов как инертных тел при возвратно-поступательных колебаниях проявляется в их силовом воздействии, на привод. Это реактивное воздействие обусловлено инерцией рабочих органов. Развивается значительная механическая реактивная мощность, обусловленная массой рабочих органов, почти на порядок превышающая полезную мощность, расходуемую непосредственно на рабочий процесс, снижая его эффективность. Механическая реактивная мощность трансформируется в реактивную электрическую мощность, потоки которой в питающей сети порождают существенные тепловые потери в проводах. В результате имеет место экологический ущерб за счет рассеивания теплоты в атмосферу.

Цель исследования состоит в минимизации экологического ущерба от вибрационных машин.

Актуальность работы обусловлена широким распространением вибрационных машин в горном деле [1–3].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными методами исследования в рамках настоящей работы являются методы математического моделирования и анализа. При этом исследуется не сам физический объект, а его математическая модель – "эквивалент" объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства – законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д. Используемые виды моделирования являются

детерминированными, динамическими и непрерывными. Основными этапами математического моделирования являются построение модели, решение математической задачи, к которой приводит модель, интерпретация полученных следствий из математической модели, проверка адекватности модели, модификация модели. Используемые методы позволяют получить достоверное описание исследуемых объектов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

*Расчет реактивной мощности.* Реактивная мощность рабочего органа обусловлена изменением его кинетической энергии. Эта мощность знакопеременная, поскольку рабочий орган попеременно получает и отдает энергию.

С удовлетворительной точностью можно считать, что изменение координаты рабочего органа имеет гармонический характер

$$x = l \sin \omega t ,$$

где  $l$  – амплитуда колебаний, м.

Скорость рабочего органа находится как производная его координаты

$$v = \frac{dx}{dt} = l\omega \cos \omega t .$$

В соответствии со вторым законом Ньютона выражение для инерционной силы, обусловленной массой системы, совершающей колебания ( $m$ , кг), имеет вид:

$$f = m \frac{d^2x}{dt^2} = -l m \omega^2 \sin \omega t .$$

Мгновенная реактивная мощность, обусловленная массой одного рабочего органа, определяется выражением

$$r = fv = -l^2 m \omega^3 \sin \omega t \cos \omega t = -\frac{l^2 m \omega^3}{2} \sin 2\omega t .$$

Для вибрационной сортировальной машины ОЗС-50  $l = 7,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $n = 8$  Гц;  $m = 92$  кг. При этом  $\omega = 2\pi n$ .

Эти данные позволяют рассчитать реактивную мощность, развиваемую одним рабочим органом, за которую принимается амплитуда мгновенной мощности.

$$R_1 = \frac{l^2 m \omega^3}{2} = \frac{(7,5)^2 10^{-6} \cdot 92 \cdot 2^3 \pi^3 8^3}{2} \approx 328 \text{ Вт}.$$

*Расчет рассеивания теплоты в атмосферу.* При циркуляции электрической энергии в питающей сети в проводах выделяется теплота, что является причиной потерь, которые достигают порядка 10% от потребляемой мощности.

Расчетная потребляемая реактивная мощность вибрационной сортировальной машины ОЗС-50 для четырех решетных станов составляет

$$R_4 = 4R_1 = 1312 \text{ Вт}.$$

В соответствии с этим расчетные потери в сети равны

$$P = 0,1R_4 = 131 \text{ Вт}.$$

При работе вибрационной сортировальной машины ОЗС-50 в течение 1000 часов в году в атмосферу рассеивается количество теплоты равное

$$Q = 4,19Pt = 4,19 \cdot 131 \cdot 1000 \cdot 3600 \approx 2 \text{ Гкал}.$$

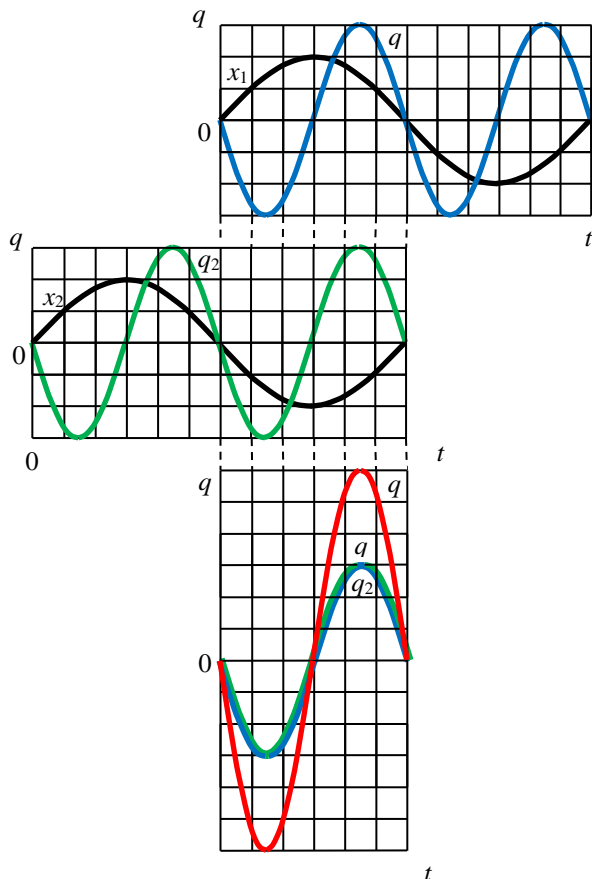


Рис. 1. Смещение фаз колебаний массивных рабочих органов на  $\pi$

*Самонейтрализация реактивной мощности.* Во многих вибрационных машинах с двумя массивными рабочими органами фазы колебаний рабочих органов смещены на половину периода колебаний. Графики их реактивной механической мощности изображены на рисунке 1. Очевидно, что результирующая мощность равна удвоенной реактивной мощности каждого рабочего органа.

Для компенсации реактивной механической мощности в гармонических технологических процессах фазы колебаний массивных рабочих органов следует сместить на четверть периода колебаний [4].

Графики реактивной механической мощности при смещении фаз колебаний массивных рабочих органов на  $\pi/2$  изображены на рисунке 2.

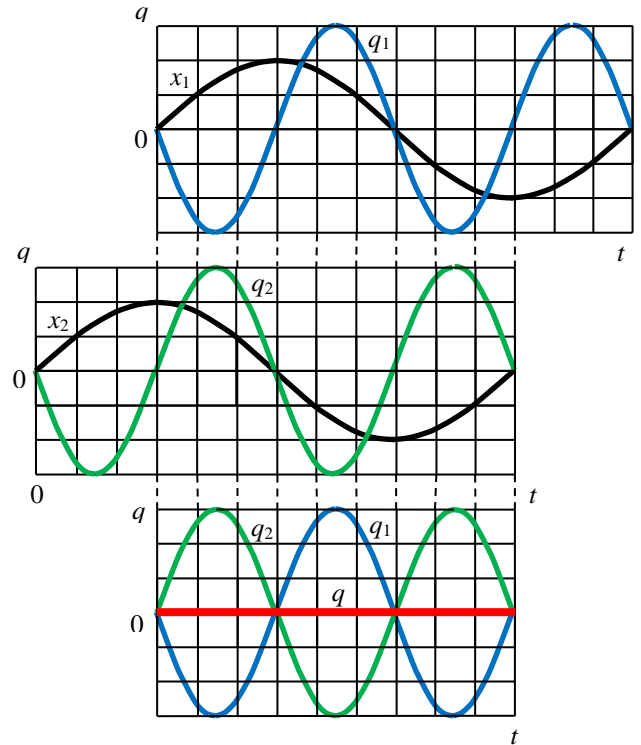


Рис. 2. Компенсации реактивной механической мощности

Очевидно, что результирующая мощность равна нулю. Это означает, что энергия торможения одного массивного рабочего органа расходуется на ускорение другого, а не передается приводу и далее в сеть.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Таким образом, при работе вибрационных машин имеет место существенный экологический ущерб за счет непроизводительного рассеивания теплоты в атмосферу.

При смещении фаз колебаний массивных рабочих органов на  $\pi/2$  энергия питающей сети расходуется только на возмещение потерь на трение и на собственно технологический процесс. Для обеспечения знакопеременного ускорения массивных рабочих органов она не используется, что повышает энергоэффективность технологических процессов [5] и минимизирует экологический ущерб от вибрационных машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чеботаева, Е. М. Синергетический эффект модульной структуры автоматизированной системы управления дробильно-сортировочным производством / Е.М. Чеботаева, Е.Н. Фокина, С.В. Зинченко // Межотраслевой институт «Наука и образование». Ежемесячный научный журнал. 2014. № 5. С. 66-69.

2. Гаврилова, Н.Г. Актуальность применения модульной структуры САУ дробильно-сортировочным производством / Н.Г. Гаврилова // Сборник трудов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов НИУ МГСУ за 2014-2015 учебный год. Москва: НИУ МГСУ, 2015. С. 259-263.

3. Гимадетдинов, М.К. Определение перечня и последовательности решения задач автоматизированного дробильно-сортировочного производства / М.К. Гимадетдинов, А.В. Остроух // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. – №4. – С. 55-61.

4. Попов, И.П. Попутная оптимизация производительной мощности решетных сортировальных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №1(21). С.4-6.

5. Парсункин, Б.Н. Методика оценки эффективности мероприятия по совершенствованию показателей производственного процесса / Б.Н. Парсункин, Т.Г. Сухонослова, Е.И. Полухина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. – Т.14, №3. – С. 121–126.

## MINIMIZING ENVIRONMENTAL DAMAGE FROM VIBRATION MACHINES

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popov@yandex.ru

**Abstract.** It is shown that during the operation of vibration machines, a significant mechanical reactive power develops, due to the mass of the working bodies. Mechanical reactive power is transformed into reactive electrical power, the flows of which in the supply network generate significant heat losses in the wires. As a result, there is environmental damage due to the dissipation of heat into the atmosphere. In many vibration machines with two massive working bodies, the phases of their oscillations are shifted by half the oscillation period. Obviously, the resulting power is equal to twice the reactive power of each working body. To compensate for reactive mechanical power, the oscillation phases of massive working bodies should be shifted by a quarter of the oscillation period. In this case, the resulting power is zero. This means that the braking energy of one massive working body is spent on accelerating another, and is not transferred to the drive and further into the network. Thus, the energy of the supply network is spent only on compensation for friction losses and on the actual technological process, which leads to minimization of environmental damage from vibration machines.

**Keywords:** harmonic process, reactive power, compensation, oscillation phase shift.

### REFERENCES

1. Chebotaeva Ye.M., Fokina Ye.N., Zinchenko S.V. The synergistic effect of the modular structure of the auto-mated sorting, crushing and production management systems [Sinergicheskiiy effekt modulnoy struktury avtomatizirovannoy sistemy upravleniya drobilno-sortirovochnym proizvodstvom]. *Mezhotraslevoy institut «Nauka i obrazovanie»* [Interdisciplinary Institute «Science and Education»]. 2014, no. 5, pp. 66–69. (In Russian).

2. Gavrilova N.G. The urgency of the application of the modular structure of the ACS crushing and screening production. Proceedings of the scientific conference on the results of research works of students of the Higher MSUCE for 2014-2015 academic year [Aktualnost primeneniya modulnoy struktury SAU drobilno-sortirovochnym proizvodstvom]. *Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov NIU MGSU za 2014–2015 uchebnyy god*. M.: NIU MGSU [Moscow: Publishing House of the MSUCE]. 2015, pp. 259–263. (In Russian).

3. Gimadetdinov M.K., Ostroukh A.V. Definition list and sequence solving automated crushing and screening production [Opredelenie perechnya i posledovatelnosti resheniya zadach avtomatizirovannogo drobilno-sortirovochnogo proizvodstva]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Automation and Control in Technical Systems]. 2014, no. 4, pp. 55–61. (In Russian).

4. Popov I.P. Associated optimization of productive capacity of lattice sorting machines [Poputnaya optimizatsiya proizvoditel'noy moshchnosti reshetnykh sortiroval'nykh mashin]. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.1(21), pp.19-21. (In Russian).

5. Parsunkin B.N., Sukhonosova T.G., Polukhina E.I. A method of evaluating the performance of a production process improvement action [Metodika otsenki effektivnosti meropriyatiya po sovershenstvovaniyu pokazateley proizvodstvennogo protsesssa], *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 121–126. (In Russian).

Попов, И.П. Минимизация экологического ущерба от вибрационных машин / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №2(22). С.32-34.

Popov I.P. Minimizing environmental damage from vibration machines. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2020, no.2(22), pp.32-34. (In Russian).